

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Институт наук о Земле

Кафедра картографии и геоинформатики

Тарасова Евгения Ивановна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОСТАВЛЕНИЯ КАРТ И МЕТОДОВ
АВТОМАТИЗАЦИИ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ
АЭРОНАВИГАЦИИ

Магистерская диссертация

Научный руководитель:
Доцент, к.г.н. Капралов Е.Г.

«__»_____ 2017 г.

Заведующий кафедрой:
Доцент, к.т.н. Паниди Е.А.

«__»_____ 2017 г.

Санкт-Петербург

2 0 1 7

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Аэронавигация и ГИС. Мировой опыт составления аэронавигационных карт...	6
1.1. Аэронавигационные карты: понятие, содержание, функции.....	6
1.2. Мировой опыт составления аэронавигационных карт. Современное состояние разработок в области составления аэронавигационных карт с использованием ГИС.	8
1.2.1. Изображение рельефа на аэронавигационных картах служб и центров аэронавигационной информации мира.....	13
1.2.1.1. Отсутствие изображения рельефа.....	13
1.2.1.2. Изображение рельефа способом изолиний.....	16
1.2.1.3. Изображение рельефа с использованием теневой пластики.....	28
Глава 2. Автоматизация в картографии. Геоинформационное обеспечение мультимасштабного картографирования для задач аэронавигации.....	32
2.1. Автоматизация в картографии.....	32
2.2. Мультимасштабное картографирование – новое направление географической картографии.....	32
2.3. Геоинформационное обеспечение аэронавигации цифровыми моделями рельефа (ЦМР). Обзор источников данных для создания ЦМР.....	34
Глава 3. Формирование мультимасштабной растровой основы с рельефом и разработка стилистики для изображения рельефа на аэронавигационных картах.....	40
3.1. Исходные данные для формирования растровой основы.....	40
3.2. Требования к изображению рельефа на картах и разработка стилистики для изображения рельефа на аэронавигационных картах.....	46
3.2.1. Требования к изображению рельефа на картах.....	46
3.2.2. Разработка стилистики для изображения рельефа на аэронавигационных картах и пространственная фильтрация.....	47
Глава 4. Хранение растровых данных и обеспечение доступа к ним.....	54
Заключение.....	66
Список использованной литературы.....	67

Введение

Актуальность темы.

Информационные технологии и компьютерные методы обработки давно уже проникли во все сферы человеческой жизни. Не обошли они стороной и такую техническую дисциплину, как авиация. Практически вся информация, которой пользуются службы аэронавигации, имеет географический контекст. ГИС позволяют решать вопросы создания, редактирования и централизованного хранения аэронавигационных данных для дальнейшего использования, в частности, для проектирования карт для самолетовождения.

Аэронавигационная карта является важным документом, который используется и при подготовке к полету, и в процессе полета. Она нужна для прокладки и изучения маршрута полета, измерения путевых углов и расстояний между пунктами маршрута, определения географических координат пунктов и радиотехнических средств, обеспечивающих полет, изучения рельефа местности и определения высоты отдельных точек местности. Во время полета карта применяется для ведения визуальной и радиолокационной ориентировки, контроля пути и прокладки линий положения самолета, определения навигационных элементов полета.

Рельеф является неотъемлемым элементом содержания аэронавигационных карт, поскольку он служит для ориентирования и опознавания, определения безопасных высот пролета над местностью, четкого понимания аэронавигационной информации, планирования. Поэтому важно, чтобы элементы рельефа местности быстро и четко интерпретировались на карте, особенно когда они являются существенными, и не перенасыщали ее, не мешали пониманию пилотом основных и существенных аэронавигационных данных.

Еще совсем недавно изображение рельефа на картах центра аэронавигационной информации было достаточно грубым, негенерализованным, послойная окраска была яркой и затрудняла (особенно это было видно в горных районах) восприятие аэронавигационной информации, отсутствовало согласование соседних листов карт. Кроме этого, время работы с рельефом критично из-за больших объемов GeoTIFF-изображений. Применение и совершенствование визуализации и методов автоматизации в составлении аэронавигационных карт при работе с растровыми данными о рельефе необходимо для оптимизации процесса картосоставления.

Объектом исследования является рельеф и его изображение на аэронавигационных картах. Исследование проводится на нескольких масштабах: 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000, 1:2 000 000, 1:3 000 000, поэтому носит мультимасштабный характер.

Цель исследования. Цель работы – поиск путей оптимизации и усовершенствования процесса составления аэронавигационных карт. Цель обусловлена потребностями конкретной организации - центра аэронавигационной информации, сотрудником которой я являюсь в настоящее время.

Достижение поставленной цели предусматривало выполнение ряда последовательных этапов работы:

- анализ предшествующего опыта составления аэронавигационных карт отечественными и международными организациями на основе геоинформационных систем;
- оценка современного состояния разработок по теме изображения рельефа на картах;
- изучение требований по изображению рельефа на аэронавигационных картах;
- поиск всех доступных источников ЦМР (цифровых моделей рельефа), которые бы удовлетворяли рабочим масштабам картографирования, а также моделирование новых с их последующим анализом;
- разработка стилистики для отображения рельефа на аэронавигационных картах;
- составление единой мультимасштабной растровой основы, содержащей данные о рельефе, выполненной в едином стиле;
- обеспечение быстрого доступа к данным, решение вопроса централизованного хранения растровых данных.

Методы исследования. Работа основана на анализе доступных и смоделированных по данным из картографической базы данных (ЦАИ – центра аэронавигационной информации) ЦМР различного разрешения и составлении единого растрового покрытия по этим данным. Исследование опиралось на анализ автоматизированных методов генерализации и изображения рельефа на основе ЦМР, проведенный на кафедре картографии и геоинформатики МГУ Т.Е. Самсоновым; разработанные на кафедре оформления и издания карт МИИГАиК приемы и методы изображения рельефа, а также их совершенствования в условиях компьютеризации картографии (О.В. Ковалева, Т.В. Верещака); картографические и геоинформационные методы исследования, разработанные И.К. Лурье, В.С. Тикуновым; теоретические принципы моделирования рельефа в ГИС, изложенные С.М. Кошелем.

Использованный материалы. В качестве основных материалов в работе были использованы ЦМР Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Global Multi-resolution Terrain Elevation Data (GMTED), AsterGDEM (Aster Global Digital Elevation Model), данные с сайта (viewfinder panoramas), а также векторные данные из картографической базы данных отдела.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые обстоятельно изучен и проанализирован вопрос составления рельефа на аэронавигационных картах разных масштабов;

- составлена мультимасштабная растровая основа, покрывающая всю территорию России, обеспечивающая единое, сплошное изображение рельефа;
- разработан уникальный стиль для изображения рельефа на картах разных масштабов;
- предложен способ хранения и доступа к большим объемам данных, оптимизирующий процесс составления карт.

Защищаемые положения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- изложенный способ отбора данных с использованием оценки точности для составления растровой основы заданного масштаба обеспечивает как визуальное, так и географическое согласование разнородных источников данных;
- составленная мультимасштабная растровая основа на территорию России обеспечивает единое, согласованное изображение рельефа;
- разработанный стиль для изображения рельефа методом теневой пластики при комбинированном освещении с использованием послойной окраски, исполненный в соответствии с требованиями по изображению рельефа на аэронавигационных картах и со схемой районирования территории СССР по высоте сечения рельефа и шкале гипсометрической окраски позволяет подчеркнуть характерные особенности рельефа местности и в то же время обеспечить его приглушенное представление;
- выполненное представление растрового покрытия в виде набора тайлов разного масштабного уровня существенно сокращает время работы с данными о рельефе и, соответственно, время отрисовки карты, а предложенный способ доступа к данным значительно упрощает процесс составления аэронавигационных карт.

Практическая значимость полученных результатов. Подготовленная растровая основа в разработанной стилистике уже используется при составлении аэронавигационных карт. Кроме этого, она может быть использована при составлении других соответствующих карт (карты захода на посадку по приборам, карты района (ИКАО)).

Апробация работы. Результаты и выводы диссертационной работы представлялись и докладывались на Большом Географическом Фестивале, проводимом в СПбГУ 7 - 9 апреля 2017 года.

Структура и объем работы. Магистерская работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (92 наименования). Материал изложен на 71 страницах, содержит 5 таблиц, 67 рисунков.

Глава 1. Аэронавигация и ГИС. Мировой опыт составления аэронавигационных карт

Информационные технологии и компьютерные методы обработки давно уже проникли во все сферы человеческой жизни. Не обошли они стороной и такую техническую дисциплину, как авиация.

Для хранения и обработки различных данных с целью их анализа и издания карт государственными и негосударственными организациями зачастую используются геоинформационные системы. Авиация - отрасль, в которой необходимо использование ГИС и пространственных технологий, обеспечивающих безопасность самолетовождения. Практически вся информация, которой пользуются службы аэронавигации, имеет географический контекст.

ГИС позволяют решать вопросы создания, редактирования и централизованного хранения аэронавигационных данных для дальнейшего использования (проектирование карт для самолетовождения, издание сборников аэронавигационной информации (AIP - Aeronautical Information Publications), разработка сервисов прокладки маршрута, создание аэронавигационных планшетов, 3D - визуализация и анализ).

1.1. Аэронавигационные карты: понятие, содержание, функции

Уже в первые годы после зарождения авиации была осознана необходимость создания специальных карт для навигации в воздушной среде, то есть аэронавигации. Поначалу они основывались на обычных географических картах или строились по принципу морских карт. Но специфика авиации потребовала разработки карт, специально приспособленных для использования экипажами воздушных судов на различных этапах полета (Сарайский, 2010).

Современная аэронавигационная карта, предназначенная для полетов по приборам, мало похожа на обычную географическую. В соответствии с определением ИКАО (Руководство...2016) аэронавигационная карта - условное изображение участка земной поверхности, его рельефа и искусственных сооружений специально предназначенное для аэронавигации. Следует учитывать, что в международной практике под аэронавигационной картой (aeronautical chart) понимается не только то, что похоже на обычную географическую карту, но и то, что в России называют "схемой" (вылета, прибытия, захода на посадку), публикуемой в сборниках аэронавигационной информации.

Что касается содержания аэронавигационных карт, то его можно разделить на две составляющих: топографическая основа и аэронавигационная информация. Содержание и

насыщенность первой составляющей всегда варьируется в зависимости от типа, назначения и масштаба карты. В то время как карты для полетов в нижнем воздушном пространстве насыщены топографической информацией, на радионавигационных картах (верхнее воздушное пространство) выделяются только основные элементы топографии: крупнейшие населенные пункты и водные объекты, а также отметки высот (Сарайский, 2010).

Лист карты, в самом грубом представлении, включает в себя две основные части: основное поле (собственно карта) и то, что находится за его рамками. В свою очередь элементами собственно карты являются координатная сетка, географическое содержание и специальная информация, нанесенная на карту. Для двух последних элементов в авиации иногда используется термин "нагрузка" - соответственно географическая, аэронавигационная и т.д. Зарамочная информация включает в себя сведения, которые относятся к карте в целом и необходимы для ее применения. Это могут быть название карты или охватываемого ею региона, ее индекс (номенклатура), схема нарезки других листов карты аналогичного назначения, масштаб, вид проекции и ее параметры, дата составления и издательство, геодезическая основа карты (например, WGS-84), диаграмма искажений, условные обозначения на карте (ее легенда) и другие сведения (Сарайский, 2010).

Если проанализировать, какие задачи должна решать аэронавигационная карта, то можно выделить пять ее основных функций (Сарайский, 2010):

1. Опорно-ориентировочная функция карты заключается в возможности ее использования для ориентировки по сторонам света, определения положения места самолета относительно земных объектов и самих объектов друг относительно друга. В рамках данной функции карты речь не идет об определении координат этих объектов (это уже другая функция), а только об их общем взаимном расположении, выражаемом в терминах "севернее-южнее", "восточнее-западнее", "дальше-ближе", "правее-левее".

2. Географическая функция. Она заключается в возможности получения информации о местоположении объектов на земной поверхности, их форме размерах и т.д. Географическая нагрузка карты включает в себя изображение естественных и искусственных объектов на земной поверхности, которые могут играть роль навигационных ориентиров: водных массивов, дорог, населенных пунктов, рельефа местности и т.д. В отличие от опорно-ориентировочной функции карты, в этом случае объекты должны быть размещены на карте в соответствии с их местоположением на Земле, то есть карта должна быть выполнена в масштабе. Функция названа географической, но объекты не обязательно должны быть именно географическими. Это могут быть наземные радиомаяки, воздушные трассы, изогоны (линии, соединяющие точки с одинаковым магнитным склонением), границы различных зон и т.п.

3. Координатная функция карты обеспечивает возможность численного определения координат (широты и долготы) точек на карте - места самолета и других объектов. Для этого, как правило, используется координатная сетка, которая чаще всего имеет вид меридианов и параллелей, но иногда вместо нее нанесена сетка прямоугольных координат Гаусса-Крюгера.

4. Измерительная функция карты позволяет извлекать из карты информацию, которая в явном виде на карте не нанесена: определять расстояния и направления между любыми точками с помощью масштабной линейки и транспортира, прокладывать линии положения для определения места самолета и т.д. Для аэронавигационных карт используются такие виды проекций, которые, как правило, сводят искажения расстояний и углов к минимальным значениям, которыми на практике можно пренебречь.

5. Информационная функция аэронавигационной карты связана с нанесением на ней специальной (аэронавигационной) информации. Здесь идет речь о том, что карта является носителем информации, которая в принципе может быть приведена в других источниках: Сборниках аэронавигационной информации, Перечне воздушных трасс и т.д. Но привязка этой информации к карте повышает оперативность ее использования экипажем, уменьшает вероятность ошибок, делает представление информации более компактным.

Значение карт в аэронавигации нельзя переоценить. Карта – основное пособие для самолетовождения. Она используется и при подготовке к полету, и в процессе полета. При подготовке к полету карты нужны для прокладки и изучения маршрута полета, измерения путевых углов и расстояний между пунктами маршрута, определения географических координат пунктов и радиотехнических средств, обеспечивающих полет, изучения рельефа местности и определения высоты отдельных точек местности. Во время полета карта применяется для ведения визуальной и радиолокационной ориентировки, контроля пути и прокладки линий положения самолета, определения навигационных элементов полета. Карты также необходимы службе движения для руководства полетами и проверки правильности их выполнения.

1.2. Мировой опыт составления аэронавигационных карт. Современное состояние разработок в области составления аэронавигационных карт с использованием ГИС

В настоящее время существует достаточно большое количество программных продуктов (EUROCONTROL, Services/products for AIS), предназначенных для составления аэронавигационных карт. В большинстве случаев это полностью готовые решения, основанные на концепции database-driven cartography, т. е. «картографии, движимой базами данных» (Cartographic...2004), которые предоставляют исчерпывающий функционал как для

хранения аэронавигационных и топографических баз данных, так и для редактирования этих данных, а также осуществление поддержки для их корректной работы. Но есть также и продукты, реализованные только для решения каких-либо конкретных задач, например, только для хранения аэронавигационных данных с целью дальнейшего распространения, или только для проектирования конкретных аэронавигационных карт.

Carmenta (carmenta.com/en/)

Уже более 30 лет компания «Carmenta» поставляет программное обеспечение мирового класса для разных областей. Компания предоставляет высокопроизводительные программные продукты, разрабатывает клиентские решения и предлагает широкий спектр услуг, которые помогают наиболее технологически продвинутым клиентам в мире оптимизировать свои операции с использованием геопространственной информации в реальном времени.

В аэронавигационном картографировании нашли применение программные продукты:

- Carmenta Engine – предоставляет компоненты и инструменты, которые дают возможность разработчикам программного обеспечения оперативно добавлять изображения динамических карт и других продвинутых функций карт к различным приложениям. В добавление к этому, Carmenta Engine предлагает превосходную производительность карт и проверенную круглосуточную надежность после нескольких лет непрерывного обслуживания в системах защиты и безопасности. Продукт обеспечивает системы масштабируемыми и легкоуправляемыми решениями, которые управляют всем, что связано с картами и другой геопространственной информацией. Политика компании, направленная на открытость и принятие открытых стандартов (стандарты OGC - Open Geospatial Consortium), позволяет Carmenta Engine с легкостью подключаться к map servers. Кроме этого, есть возможность прямого подключения к многочисленным файловым источникам данных, так же как и к пространственным базам данных.

- Carmenta Map Builder – используется для подготовки так называемых карт-подложек (background maps). Процесс картографирования намного упрощается, сохраняя тем самым драгоценное время. Карты могут подготавливаться из различных источников, например векторные карты с данными Navteq и OpenStreetMap могут быть объединены с навигационными картами, цифровыми моделями рельефа и изображениями высокого разрешения. Интуитивно понятный интерфейс позволяет с легкостью как настраивать пользовательскую систему условных обозначений и легенду карты, так и добавлять другие данные (все, что относится к изданию карты).

CGX (cgx-group.com/en/)

С 1996 года компания CGX занимается проектированием и разработкой решений, направленных на улучшение существующего функционала большинства ГИС для задач воздушного пространства, горнолыжных курортов, а также обеспечения обороны и гражданской безопасности.

Решения в области аэронавигационного картографирования: для составления аэронавигационных карт имеется собственный набор инструментов. Карты составляются согласно требованиям ICAO, в соответствии с AIP (сборник аэронавигационной информации) или любым другим пользовательским требованиям. Картографическое руководство основано на инструкциях ICAO и на различных AIP. В этих руководствах изложены все требования, которые должны выполняться при составлении карт. При переиздании карт с устаревшими данными есть возможность переноса карт в ГИС.

COMSOFT Solutions (comsoft.aero/products-solutions/)

COMSOFT Solutions GmbH был основан в 2016 году в основном из бывшей компании COMSOFT GmbH, учрежденной в 1979. Сегодня пользователей услуг компании можно найти в каждом регионе ICAO.

Программный продукт для аэронавигации - COMSOFT Solutions Aeronautical Information Management Solution – предлагает широкий спектр функциональности для комплексного управления аэронавигационной информацией. Представлен следующим набором модулей: Flight Planning, Briefing, NOTAM Office, Central AIM Database, Electronic AIP, Procedure Design, Aeronautical Charting.

Программный модуль для аэронавигационного картографирования - Aeronautical Charting – объединен с проектированием процедур маневрирования, поддерживает составление карт аэродрома, маршрутных карт и других связанных карт. Отличительные черты модуля: полная цепочка производства карт; формирование все карт ICAO на основе предустановленных шаблонов; мощная структура ESRI GIS для совершенствования каждой конкретной карты; наличие библиотеки аэронавигационных условных знаков; представление аэронавигационных данных в зависимости от типа аэродромной карты.

ATALIS (atalis.aero/presentation.html) - модульный программный продукт для автоматизации аэронавигационной информации от производства и обслуживания до эксплуатации в системах аэронавигационной информации. Доступны различные функции для создания комплексной и согласованной системы, отвечающей потребностям.

Модуль ATALIS Chart Management – инструментарий для производства карт, предоставляющий все возможности для проектирования любого вида аэронавигационных карт, динамически связанных с базой данных AIXM (Aeronautical Information Exchange Model - модель обмена аэронавигационной информацией). Основанный на мировых

стандартах ГИС, программный модуль содержит большое количество инструментов. Основные функции основаны на стандартах ГИС MapInfo.

ESRI – пионеры в решении проблем с использованием ГИС. Разработанная ГИС ArcGIS - самое мощное в мире программное обеспечение для ГИС-анализа и картографирования. Среди многочисленных программных продуктов компании существует специальный продукт ArcGIS for aviation: Charting (esri.com/software/arcgis/extensions/aviation/charting) – позволяет повысить эффективность производства аэронавигационных карт, помогая создавать и управлять картами из системы, управляемой базой данных. Обновления в центральной базе данных автоматически отражаются на соответствующих картах. Программное обеспечение упрощает и рационализирует процесс производства аэронавигационной картографической продукции за счет объединения картографических инструментов редактирования, моделей баз данных, авиационных символов и стилей. Продукт можно настраивать под производство пользовательских аэронавигационных карт со своей картографической спецификацией через предварительно настроенные символы и инструменты системы. Предусмотренные шаблоны позволяют с легкостью генерировать карты, совместимые с требованиями ICAO. ArcGIS for Aviation: Charting предоставляет инструменты проверки данных на основе правил валидации. Кроме этого, есть возможности еще большей автоматизации процесса с помощью встроенного языка Python, который поможет сократить большой объем монотонной работы.

FREQUENTIS (frequentis.com/ru/at/home) – компания, занимающаяся разработкой информационных систем и программных модулей в таких областях, связанных с обеспечением безопасного движения транспорта: аэронавигации, морской навигации, работы спасательных служб и др. Для аэронавигации компания предлагает полные модульные решения, включая базу данных AIXM, интегрированное управление данными NOTAM и METEO, веб-интегрированный пилотный брифинг, ведение электронного AIP и картографирование на основе ГИС. Модуль SmartCharting, основанный на ГИС и предназначенный для составления аэронавигационных карт всех видов, позволяет с легкостью создавать карты как в электронном, так и в бумажном виде. Интегрированность системы с БД AIXM дает возможность обновлять карты к дате ее вступления в силу.

IDS (Ingegneria Dei Sistemi) (idscorporation.com/, idscorporation.com/airnavigation/our-solutions-products/aeronautical-information-services-management/products/)

IDS предоставляет широкий спектр инновационных, безопасных и экономически эффективных продуктов и решений в нескольких областях, охватывающих аэронавигацию, авиационную и военно-морскую промышленность, а также работу с георадаром.

Для задач аэронавигационного картографирования - ICE, Integrated Cartographic Environment – система для производства карт в соответствии с требованиями ICAO в среде

ГИС. Система обеспечивает контроль над процессами, связанными с производством и обслуживанием авиационных карт, а также высокий уровень автоматизации, позволяющий значительно сократить время и затраты на производство. По умолчанию ICE содержит базу данных и предопределенный набор правил (шаблонов), позволяющий оперативно создавать карты. Технологическая цепочка обновления карт:

- ввод пользователем новых или измененных аэронавигационных данных в базу;
- распознавание системой всех необходимых к изданию карт в следующем цикле;
- предпечатная подготовка карты, которая заключается в растаскивании перекрывающихся элементов карты с сохранением этих изменений для следующего переиздания.

NedGraphics (cadac.com/media/3026/doc_br_smartglobe_acs.pdf) – компания, специализирующаяся в геоинформационных технологиях и предлагающая широкий спектр программных решений для разных задач: разработка программного обеспечения для проектирования, управления, публикации цифровых карт.

SmartGlobe, специализированная система для авиационной отрасли. В 1999 SmartGlobe была выбрана в качестве картографического продукта для реализации проекта Eurocontrol European Aeronautical Database project. SmartGlobe предоставляет возможности составления, обслуживания (сопровождения) карт и аэронавигационных данных из одного ресурса (ngdc.noaa.gov/mgg/global/). Таким образом, можно быть уверенным, что каждая карта составлена по одним данным. Аэронавигационные данные могут быть автоматически сгенерированы из аэронавигационной базы данных. Объекты, размещенные на карте, также связаны с базой данных, что позволяет в любой момент проверить данные на карте с данными из БД. Объекты на карте размещаются в соответствии с их точным положением, направлением и расстоянием, используя инструменты работы с проекциями.

Ключевые преимущества системы smartGlobe:

- интегрированная CAD\GIS платформа позволяет составлять карты в спроецированной среде;
- единый ресурс статических данных для всех карт;
- временная БД предоставляет непрерывное хранение (историю) статических данных;
- поддержка стандартов данных ARINC 424 и AIXM;
- совместим с ICAO.

R.I.S.K. (risk.az/) – одна из лидирующих ИТ – компаний в Центральной Азии и на Кавказе, которая предоставляет решения в областях ИТ - консалтинга, ИТ - аутсорсинга, разработки приложений и ГИС.

Программный пакет для аэронавигации – Advanced Solutions for Safe and Effective Air Navigation – включает в себя 5 программных модулей: PANDA flight procedures design system, OMEGA aerodrome obstacle control system, DELTA airspace design system, ACCENT aeronautical charting system, ADM aeronautical data manager.

Система для аэронавигационного картографирования ACCENT aeronautical charting system (pandanavigation.com/) – предназначена для составления как маршрутных карт, так и карт аэродрома. Система производит автоматическую кодировку участков маршрута в соответствии с моделью AIXM, подготавливает соответствующие аэронавигационные данные в зависимости от типа карты, обеспечивает хранение карт в разных форматах. Кроме этого система оборудована полезными инструментами для ручного редактирования не масштабируемых графических и текстовых элементов.

КБ Панорама (gisinfo.ru/spread/aboutfirm) – основные виды деятельности фирмы: разработка и внедрение программно-аппаратных средств с применением ГИС и технологий, которые используются как в народном хозяйстве, так и в интересах обороны страны, разработка корпоративных информационных систем; создание картографических Интернет-сайтов.

ГИС "Панорама", комплекс подготовки документов аэронавигационной информации - представляет собой набор инструментов для ведения базы аэронавигационных данных, проектирования маршрутов вылета, подхода и посадки, моделирования аэронавигационной обстановки, формирования аэронавигационных карт и обмена данными с другими информационными системами в текстовом формате ARINC424-19 и формате метаданных AIXM 5.1 и WFS2.0. Комплекс позволяет формировать все виды аэронавигационных карт. Аэронавигационные карты формируются в электронном виде, базируются на специальном аэронавигационном классификаторе dfc.rsc. Вывод информации осуществляется в форматы ARINC AIXM 5.1 WCS 2.0, сборник аэронавигационной информации или на аэронавигационную карту непосредственно из базы данных (gisinfo.ru/products/anibase).

1.2.1. Изображение рельефа на аэронавигационных картах служб и центров аэронавигационной информации мира

1.2.1.1. Отсутствие изображения рельефа на картах

Как оказалось, рельеф на аэронавигационных картах изображается не всегда. Обратимся к аэронавигационным картам, которые подготавливают в службе управления

воздушным движением в воздушном пространстве Нидерландов LVNL (Air Traffic Control the Netherlands = Luchtverkeersleiding Nederland) (рис. 1-3):

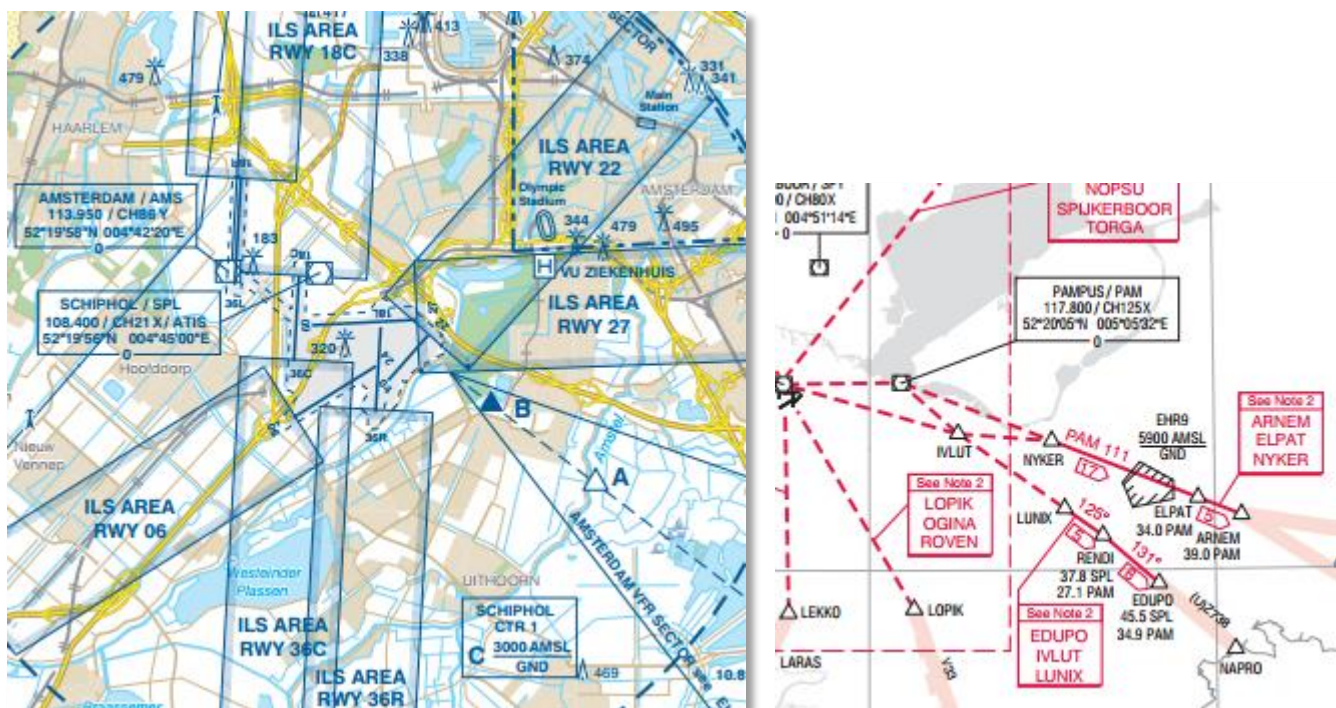


Рис.1, 2. Фрагменты карт аэродрома Амстердам (м-б 1:250 000, 1:500 000) (ais-netherlands.nl/)

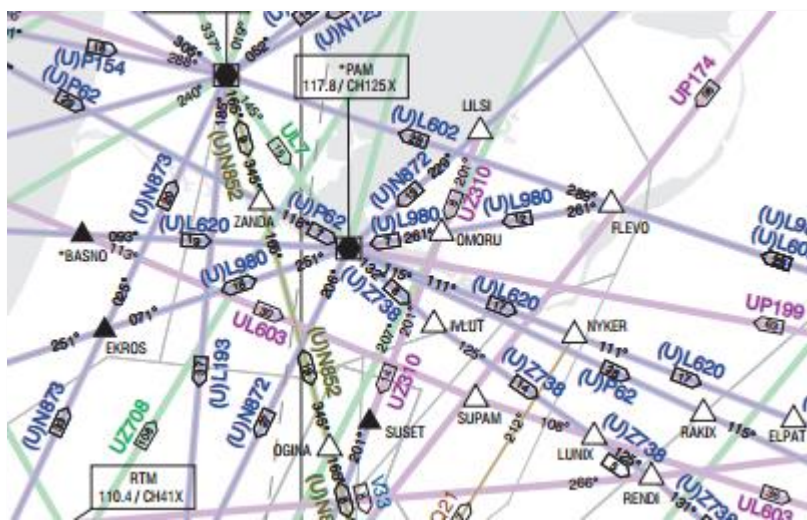
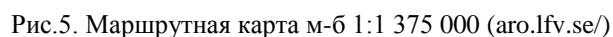


Рис.3. Фрагмент маршрутной карты, м-б 1:1 000 000 (ais-netherlands.nl/)

Как видно, вне зависимости от масштаба, на любой из карт элементы рельефа не изображены вовсе, нет даже высотных отметок, только отметки высот препятствий. Можно объяснить это тем, что рельеф Нидерландов в основном составляют прибрежные низменности, половина территории лежит ниже уровня моря, и только на юге местность повышается до 30 метров и более.

Однако такую же ситуацию можно наблюдать и на аэронавигационных картах системы обеспечения безопасности воздушного движения в воздушном пространстве Швеции (AROWeb



В отделении контроля за воздушным движением Бразилии DECEA (Department of Airspace Control), где в том числе издают аэронавигационные карты воздушного пространства, также отсутствует изображение рельефа, даже в горных районах страны:



Рис.6. Маршрутная карта, лист L2, м-б 1:2 000 000 (aisweb.aer.mil)

1.2.1.2. Изображение рельефа способом изолиний

Пожалуй, самым распространенным способом изображения рельефа на аэронавигационных картах является способ изолиний, совмещенный в некоторых случаях с послойной окраской. При этом качество исполнения, несомненно, различается у разных служб.

Составлением аэронавигационных карт центра аэронавигационной информации Армении, осуществляющей аэронавигационное обслуживание полетов в воздушном пространстве Республики Армения, занимается служба информационных технологий, которая выпускает как маршрутные карты, так и карты аэродромов (рис.7, 8):

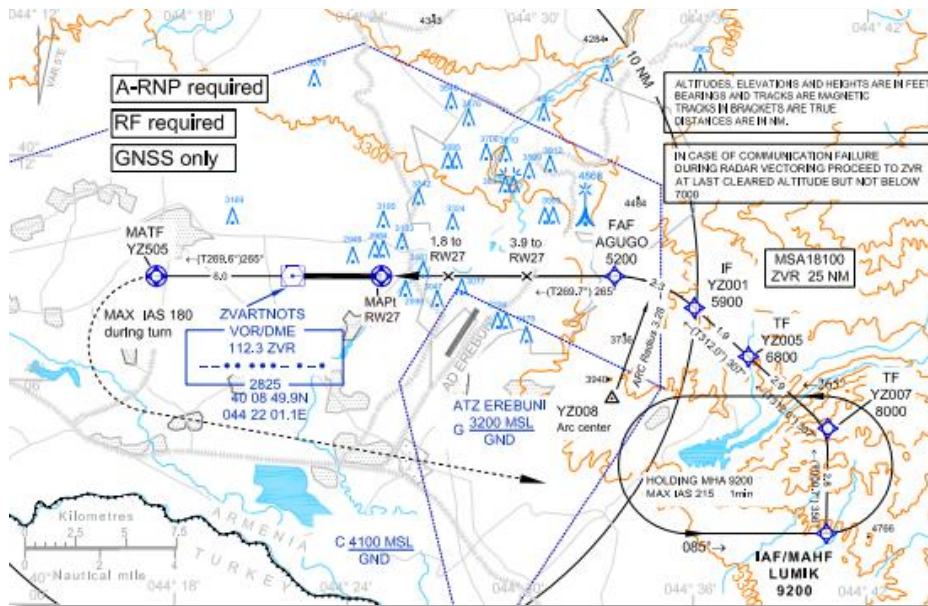


Рис. 7. Уменьшенный фрагмент карты захода на посадку по приборам, аэродром Ереван (Instrument approach chart), м-б 1:250 000 (armats.com/arm/aviation/products/)

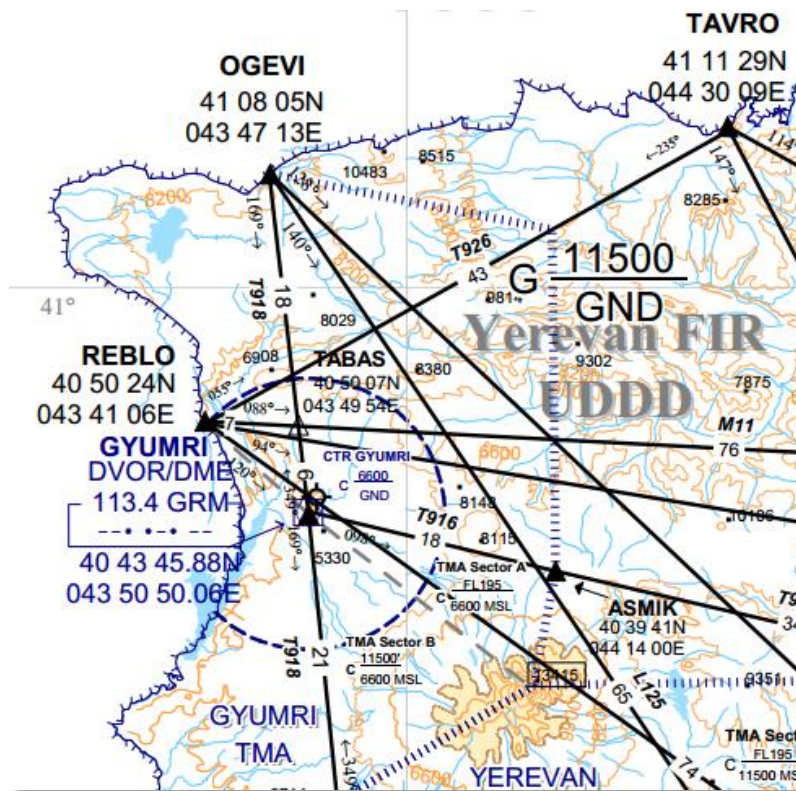


Рис. 8. Фрагмент маршрутной карты (En route chart), м-б 1:1 000 000 (armats.com/arm/aviation/products/)

На картах из элементов топографической основы присутствует лишь линейная, площадная гидрография и горизонталы. Изображение рельефа характеризуется слабой проработанностью – некачественная генерализация изолиний, наличие разных высотных ступеней (3300 – 5000 – 6600 – 8200 – 9900 м), автоматическая расстановка подписей со значениями высоты дается крупным кеглем и накладывается на изображения других

элементов, что мешает чтению других элементов карты. Кроме этого, были обнаружены грубые фактические ошибки – одна и та же горизонталь была подписана с разными значениями высоты (6600 и 8200 м!), что в контексте аэронавигационных карт весьма критично. Послойная окраска рельефа начинается лишь с высоты 9900 м без дальнейшего изменения цвета с высотой. На мой взгляд, к составлению рельефа для аэронавигационных карт такой горной территории, как Армения, стоило бы уделить больше внимания.

Похожая ситуация с изображением рельефа на картах сложилась в службе аэронавигационной информации Чили, правда рисунок горизонталей все же выглядит более плавным и гладким (рис. 9, 10):

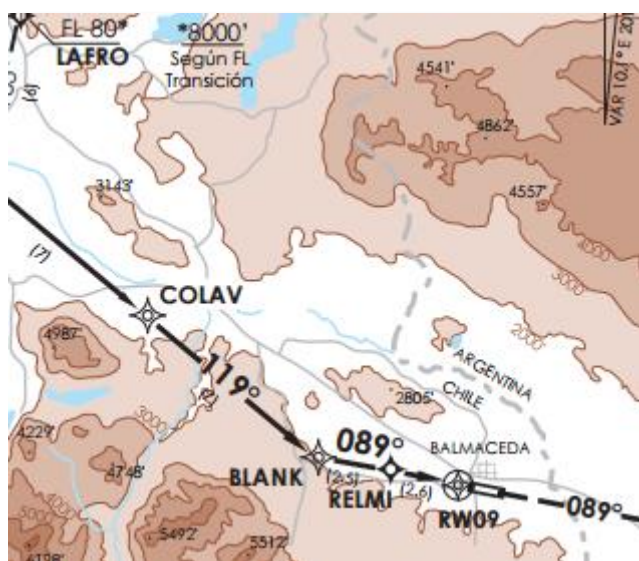


Рис.9. Карта прибытия аэродром Balmaçeda, м-б 1:300 000 (aipchile.gob.cl/)

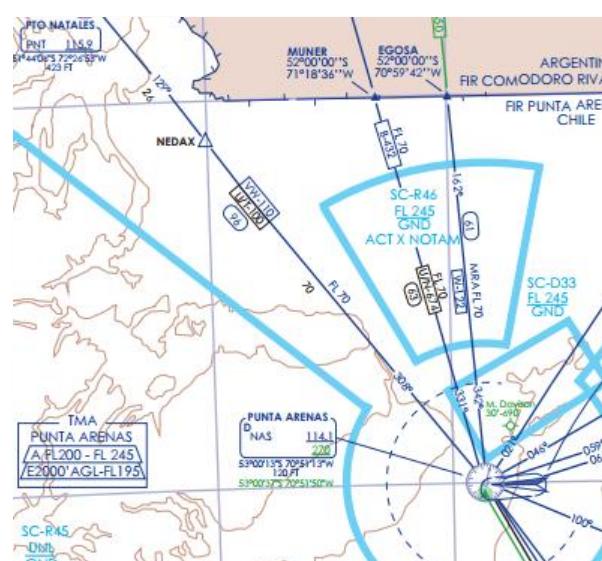


рис.10. Маршрутная карта, м-б 1:1 850 000 (aipchile.gob.cl/)

В Испании главным поставщиком аэронавигационной информации является организация ENAIRE, которая управляет системами контроля за воздушным движением, авиационной информацией и сетями связи, навигации и наблюдения, чтобы авиакомпании и их самолеты могли безопасно, плавно и аккуратно выполнять полеты в воздушном пространстве Испании. Аэронавигационные карты составляют в отделе аэронавигационной информации в программной среде ESRI ArcGIS с расширениями Data Interoperability (импорт топографических данных в базу отдела с официального топографического института Испании) и Aviation (работа с аэронавигационной базой данных и проектирование карт).



Рис. 11. Полетная карта аэродрома Барселоны, м-б 1:700 000 (enaire.es/)

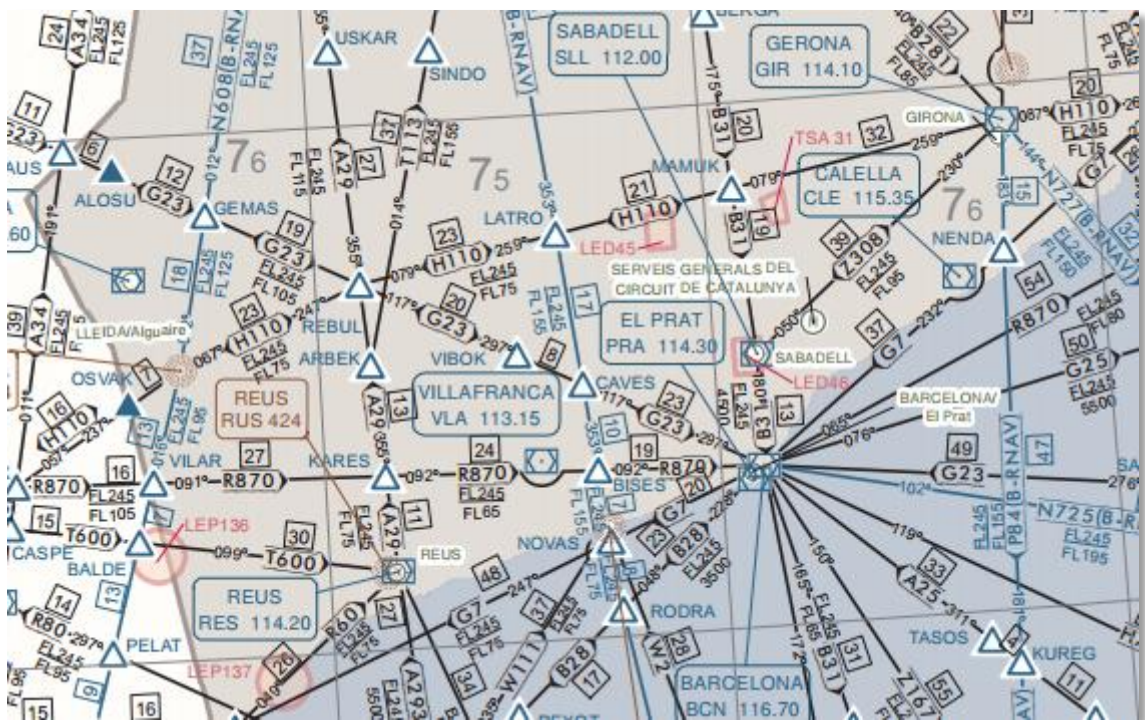


Рис.12. Маршрутная карта, м-б 1:210 000 (enaire.es/)

На картах (рис. 11, 12) не наблюдается преемственности при переходе от одного масштаба к другому, поскольку на маршрутной карте рельеф совсем не изображен (на рисунках одна и та же область). На полетной карте создается впечатление, что горизонтали не генерализованы вовсе, имеют очень острый рисунок и содержат большое количество узлов, а ступени шкалы послойной окраски слабо различимы.

В центре аэронавигационной информации Бельгии и Люксембурга «Belgocontrol», отвечающим за безопасность воздушного движения в гражданском воздушном пространстве, за которое Бельгия несет ответственность, составляют карты как маршрутные, так и карты аэродромов (рис.13, 14):

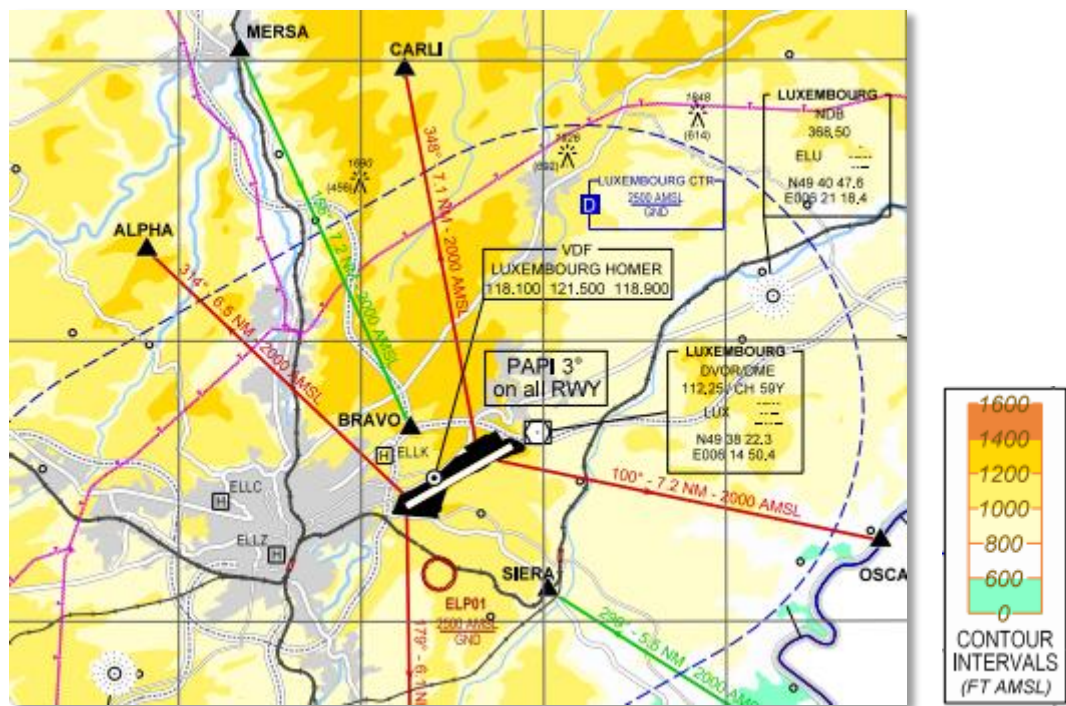


Рис.13. Фрагмент карты захода на посадку по приборам, аэродром Люксембург (Instrument approach chart), м-б 1:250 000 (belgocontrol.be/)

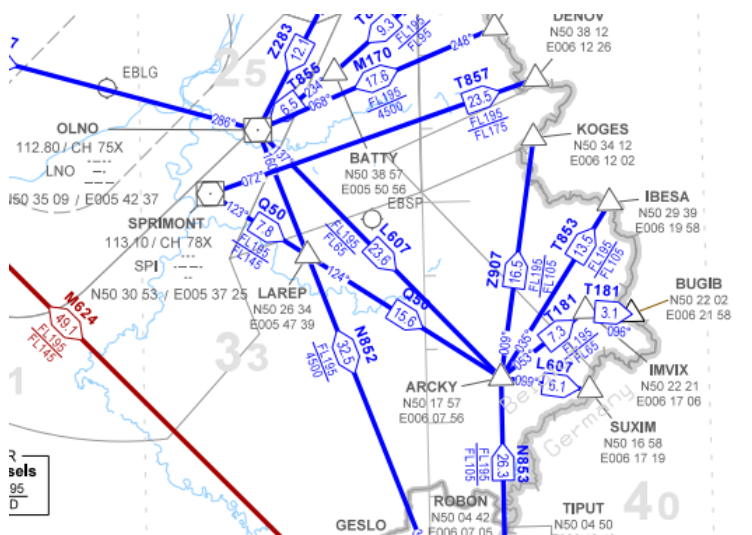


Рис. 14. Фрагмент маршрутной карты нижнего воздушного пространства (En route chart), м-б 1:1 000 000 (belgocontrol.be/)

Невозможно не обратить внимание на достаточно интересное и неестественное цветовое решение послойной окраски: шкала имеет очень насыщенные, яркие цвета ступеней, что бросается в глаза и мешает пониманию аэронавигационной информации.

Кроме этого, на карте не дано ни одной высотной отметки (присутствуют только отметки высот препятствий) и нет подписей со значением высоты у горизонталей. Все это в совокупности создает трудности в понимании ситуации в отношении рельефа местности, поскольку необходимо постоянно обращаться к легенде с послойной окраской ступеней, которая находится в углу карты. На маршрутной карте рельеф не показан вовсе, из элементов топографии присутствует лишь линейная и площадная гидрография, над изображением которых, по-видимому, было потрачено совсем немного времени.

Менее экзотично, но тоже достаточно ярко выглядит шкала послойной окраски аэронавигационных карт "Кыргызаэронавигация" (рис. 15), которое является государственным предприятием по обслуживанию воздушного движения и контролю за использованием воздушного пространства Киргизской Республики:

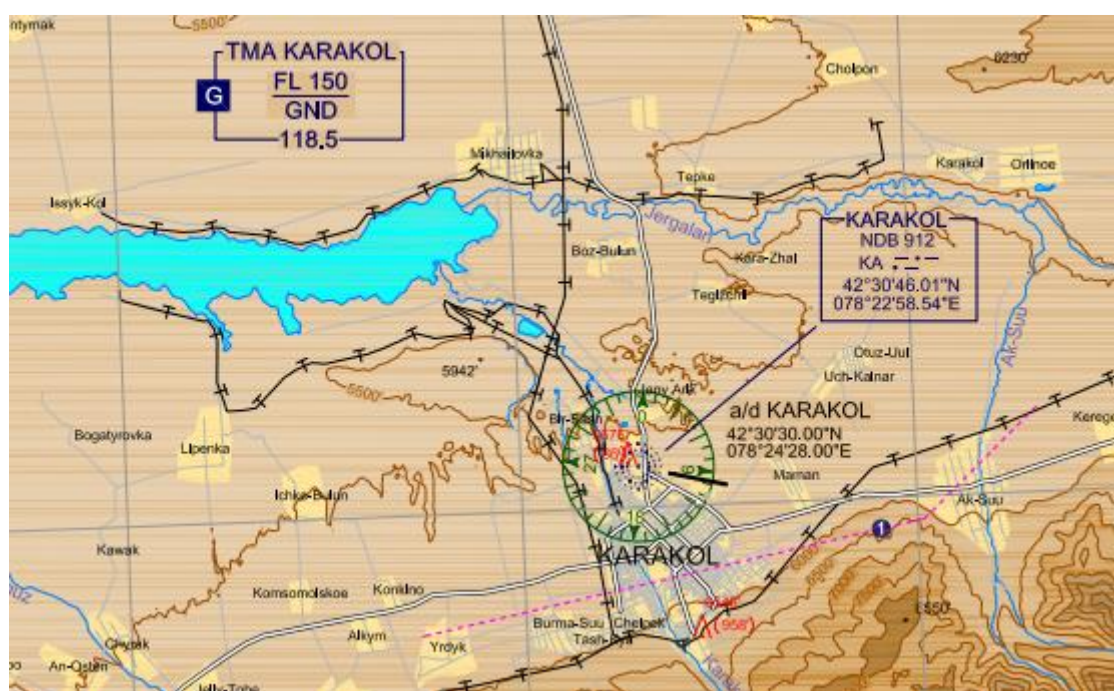


Рис. 15. Фрагмент карты прибытия аэродром Каракол, м-б 1:250 000 (kan.kg/ais)

В службе аэронавигационной информации Тайваня все карты в настоящее время составляют в CAD, но в ближайшем будущем планируется перейти на использование ГИС и производство карт из базы данных. Для изображения горизонталей были использованы данные из "National Land Surveying and Mapping Center" (рис. 16).

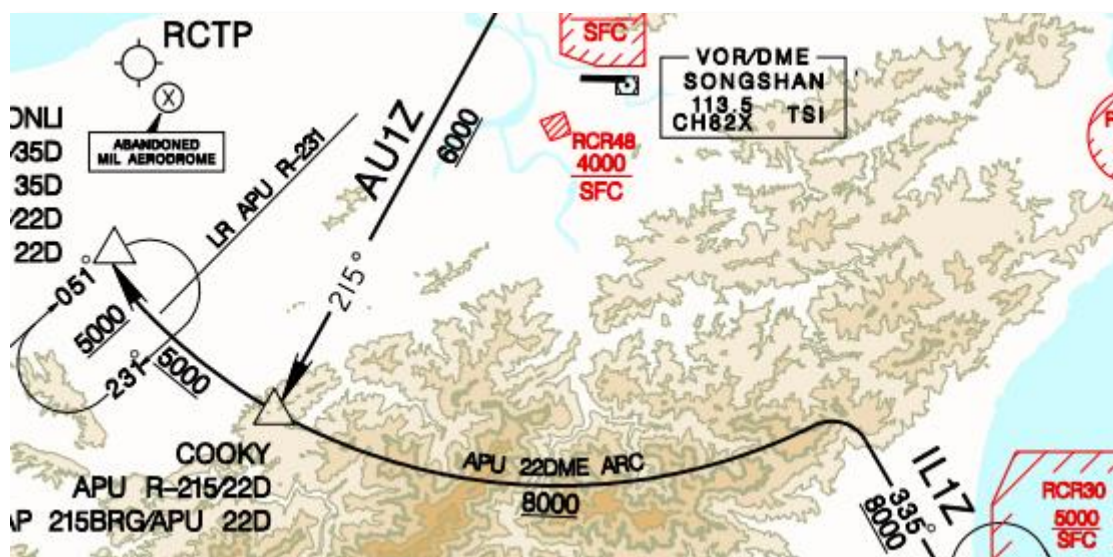


Рис. 16. Фрагмент карты прибытия аэродрома Songshan (eaip.caa.gov.tw/)

Стоит обратить внимание на карты, издаваемые управлением аэронавигационной информации Дании «Naviair» (рис. 17, 18), которое осуществляет деятельность как в воздушном пространстве Дании, так и Северной Атлантики. «Naviair» издает как аэронавигационные карты масштаба 1:500 000 (Дания) и 1:250 000 (Копенгаген), так и карты аэродромов. Карты подготавливаются в аэронавигационной картографической системе smartGlobe ATS (Aeronautical Charting System), основанной на MicroStation CAD Bentley. В качестве топографических данных используются данные государственного агентства геоданных Дании (National Danish Geodata Agency).

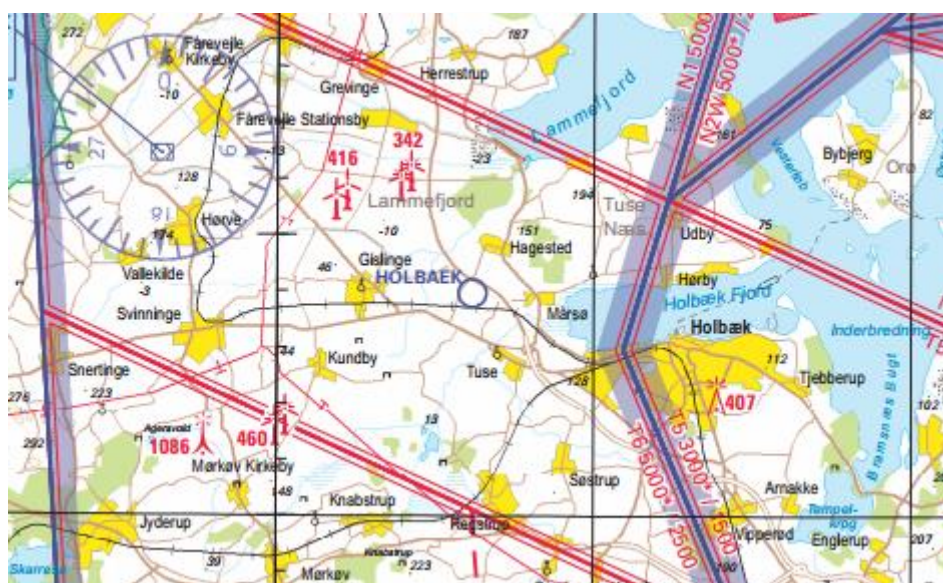


Рис. 17. Уменьшенный фрагмент аэронавигационной карты Копенгагена, масштаб 1:250 000 (aim.naviair.dk/)



Рис. 18. Фрагмент аэронавигационной карты Дании, масштаб 1:500 000 (aim.naviair.dk/)

Карты приятно удивляют своей красочностью, подробностью. Рельеф на карте едва различим, очень приглушенные цвета ступеней и стиль линий горизонталей (которые не подписаны) создают трудности в понимании характера расчленения рельефа, несмотря на наличие высотных отметок. В целом же карты качественно сделаны, приятно с ними работать.

Достойны внимания аэронавигационные карты служб аэронавигационной информации Франции и Венгрии. Во Франции главным поставщиком аэронавигационной информации является служба аэронавигационной информации (Service de l'information aéronautique), объекты которой расположены на территории аэропорта Бордо. В Венгрии же такой службой является HungaroControl, одной из самых успешных государственных компаний Венгрии, которая предоставляет воздушное навигационное обслуживание в воздушном пространстве Венгрии, обучает персонал управления воздушным движением и проводит исследования в области аэронавигации.

Карты этих служб рассматриваются вместе неслучайно: при их сравнении можно заметить некоторую связь в изображении рельефа на картах при переходе от крупного масштаба к мелкому: на картах более крупного масштаба (рис. 19-20, 22-23) рельеф показан способом изолиний с послойной окраской с подписью высоты в разрывах линий и передан более подробно; с увеличением знаменателя масштаба цветовая шкала ступеней становится более приглушенной и линии горизонталей уже не даются; на маршрутных же картах рельеф не изображается совсем (рис. 21, 24).

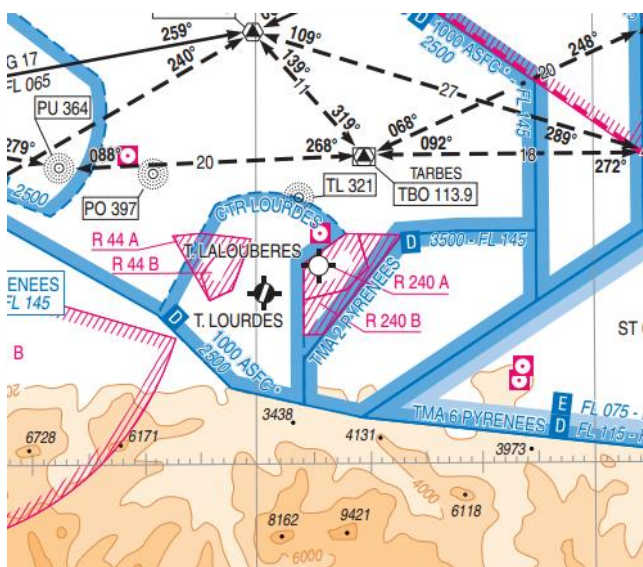


Рис. 19. Фрагмент карты района аэродрома
Пиренеи (Pau Pyrénées) (sia.aviation-civile.gouv.fr/)



Рис.20. Уменьшенный фрагмент полетной карты, м-б 1:500 000
(sia.aviation-civile.gouv.fr/)



Рис. 21. Фрагмент маршрутной карты нижнего воздушного пространства (sia.aviation-civile.gouv.fr/)

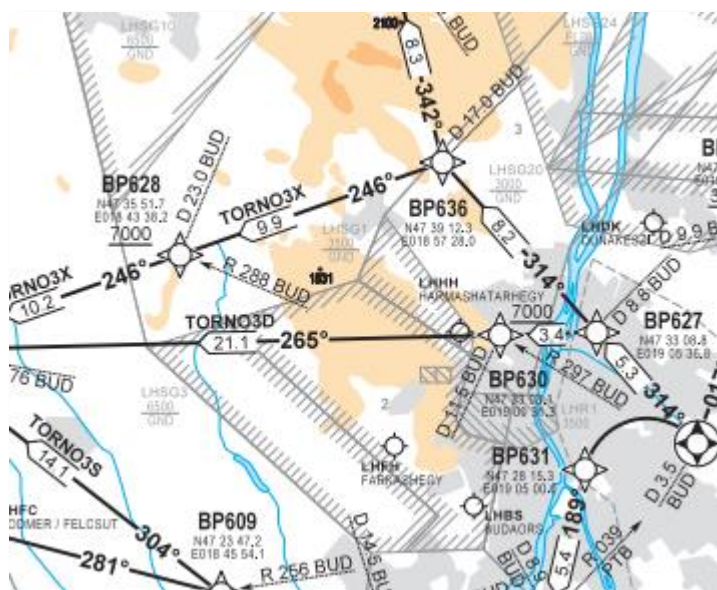


Рис. 22, 23. Фрагменты карт аэродрома Будапешт (м-бы 1:500 000, 1:200 000) (ais-en.hungarocontrol.hu/)

Кроме этого, на сайте службы размещен интерактивный ресурс (веб-приложение) AisView (рис. 26), где представляется возможность работы с векторной картой, составленной по актуальным аэронавигационным данным. С картой очень удобно работать, поскольку можно регулировать отображаемым набором слоев (как подложки, так и аэронавигационной информации), задавать свои параметры по дате и времени полета, высоте. Выставив нужные параметры, можно вывести информацию на печать.



Рис. 26. Интерфейс веб-приложения AisView (aisview.rlp.cz/)

В Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Центр Аэронавигационной Информации» (ФГУП «ЦАИ»), лидере на Российском рынке в производстве продукции и услуг, связанных с обеспечением аэронавигационной информацией, в настоящее время в работе используют базовые компоненты ArcGIS – серверные и настольные (Маслов С.Е.,....2010). Карты издают в большом их многообразии, но рельеф изображают лишь на картах визуального захода на посадку аэродрома (рис. 27):

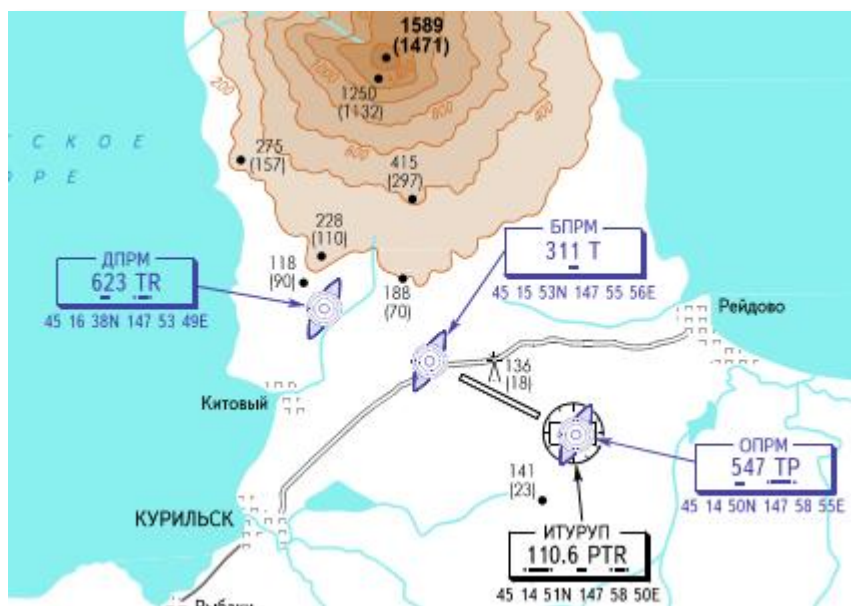


Рис. 27. Фрагмент карты визуального захода на посадку, аэродром Итуруп, м-б 1:200 000 (saiga.ru/)

Один из мировых лидеров на рынке обеспечения аэронавигационной информацией, широко известная американская компания «Джеппесен» (Jeppesen) - расширила свою сферу деятельности за пределы воздушной навигации, захватив также морскую и речную навигацию, и, помимо авиационных карт, выпускает теперь множество программ и баз данных для навигации, а также предоставляет образовательные услуги в сфере аэронавигации.

В работе по составлению и компоновке карты используется система MicroStation и ее встроенный программный модуль SmartGlobe.

Карты поставляют также и в электронном виде в приложении JeppView. Достаточно выбрать зону покрытия, а Jeppesen будет поставлять все аэронавигационные карты в электронном виде, которые удобно использовать для подготовки к полету на земле и в полете с помощью мобильного устройства в кабине (jeppesen.com/documents/).

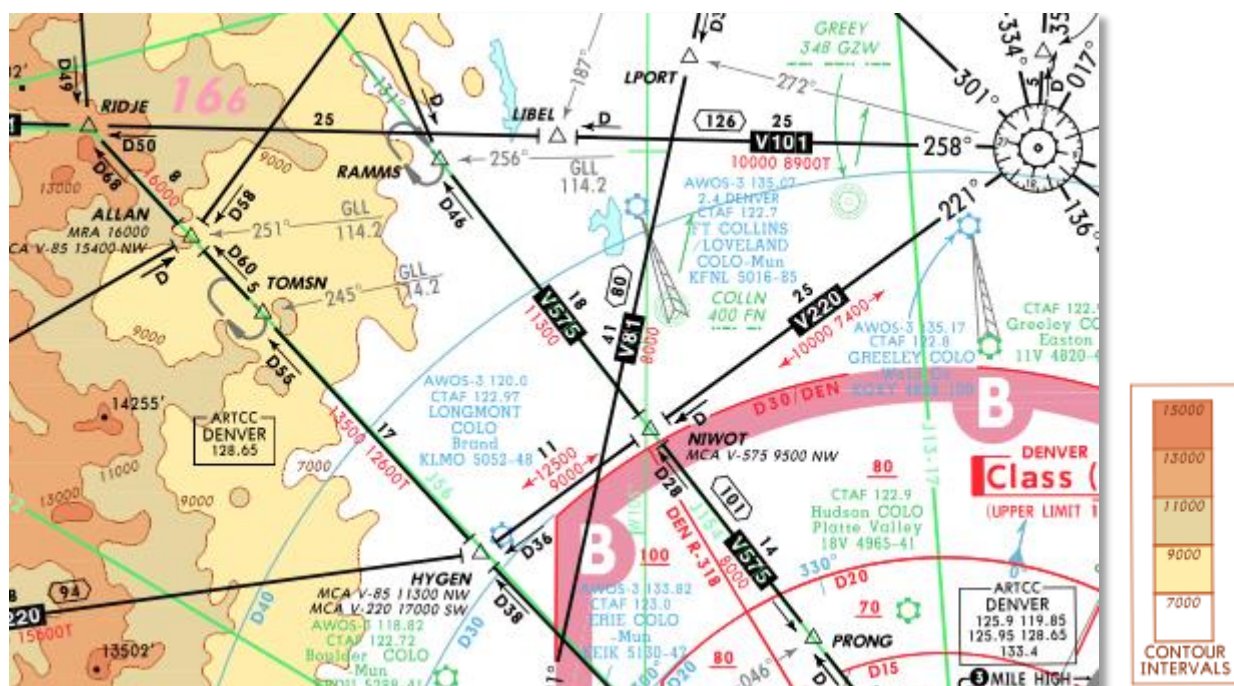


Рис. 28. Фрагмент карты района аэродрома Денвер, м-б 1:700 000 (jeppesen.com/aviation/)

Как можно заметить, рельеф на картах компании (рис. 28) изображается весьма контрастно, а подписи расставлены автоматически. Может быть, стоило подобрать шкалу послойной окраски с более плавными цветовыми переходами и дополнить изображение слоем линейной гидрографии, для более ясной картины действительного направления склонов и характера расчленения рельефа местности.

1.2.1.3. Изображение рельефа с использованием теневой пластики

Отделение аэронавигационных карт (NACO) Федеральной авиационной администрации США (FAA) выбрало программное обеспечение Production Line Tool Set (PLTS) for ArcGIS -Aeronautical Solution от компании ESRI в качестве основы для разработки и внедрения автоматизированной, базирующейся на базе данных, системы производства аэронавигационных картографических продуктов (Для производства карт...,2007).

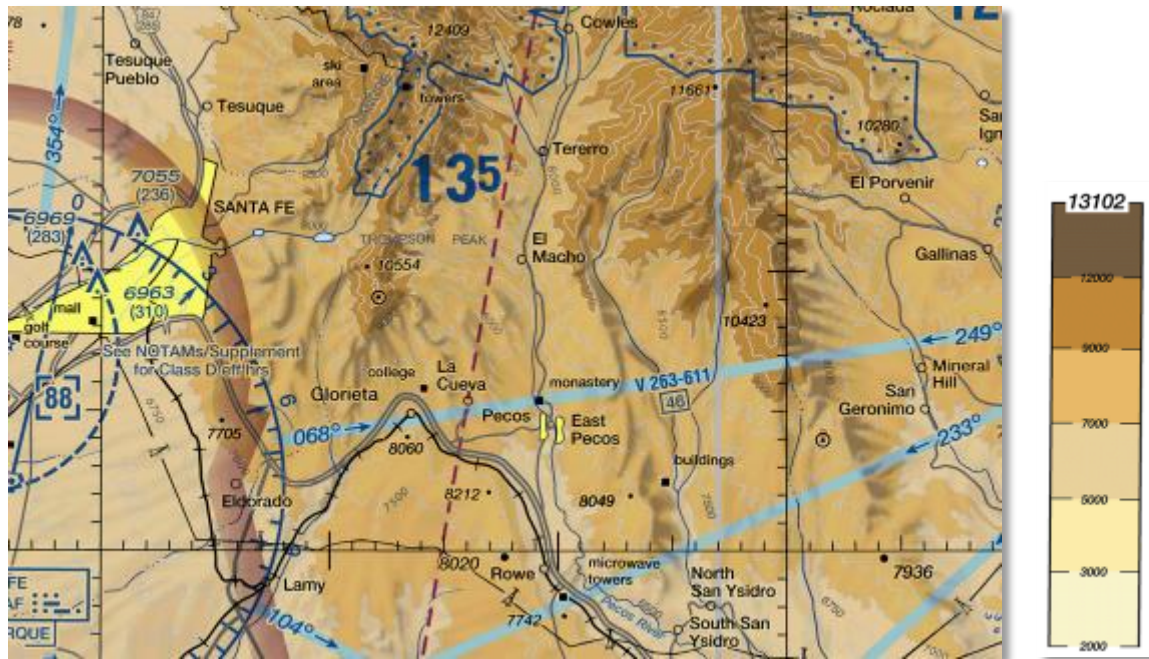


Рис. 29. Фрагмент сборной аэронавигационной карты, лист 98Р Альбукерка, м-б 1:500 000 (faa.gov/air_traffic/)

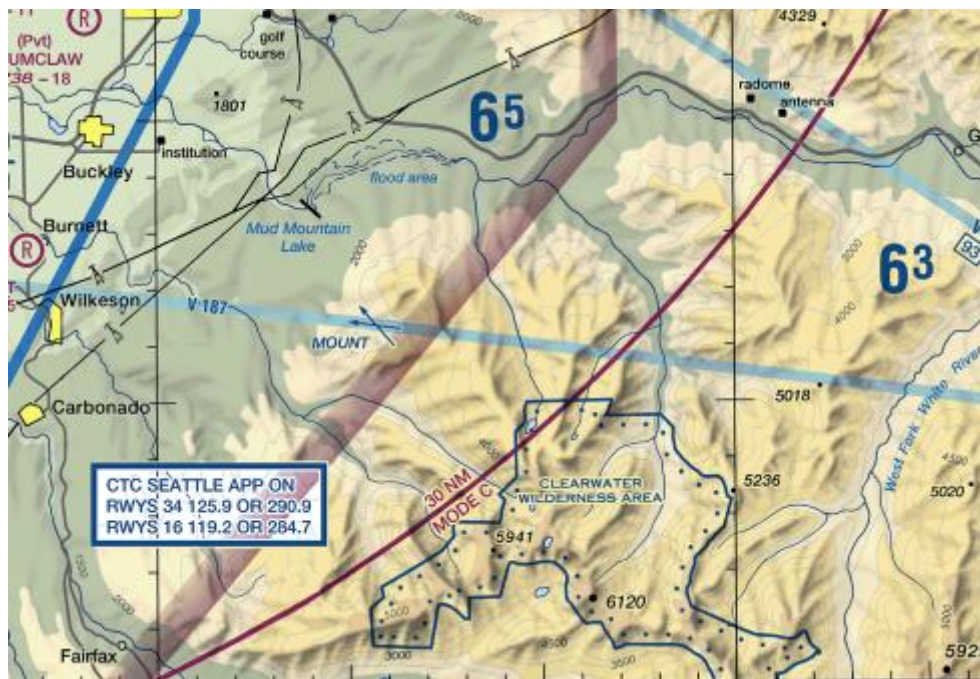


Рис. 30. Фрагмент полетной карты аэродрома Сиэтл, м-б 1:500 000 (faa.gov/air_traffic/)

Использование теневой пластики в сочетании с послышной окраской дает потрясающий эффект: хорошо читаются формы рельефа, направления склонов, хребтов (рис. 29, 30). Кроме этого, даны подписи горизонталей и отметки высот, что только улучшает понимание рельефной обстановки на местности. На электронном ресурсе (iflightplanner.com/AviationCharts) доступна полная версия сборной карты, и есть возможность оценить результаты всей проделанной работы по составлению

аэронавигационной карты масштаба 1:500 000 на территорию США. В местах стыков соседних листов можно обнаружить карты, выполненные и без применения теневой пластики, и удостовериться в действенности и наглядности способа (рис. 31):

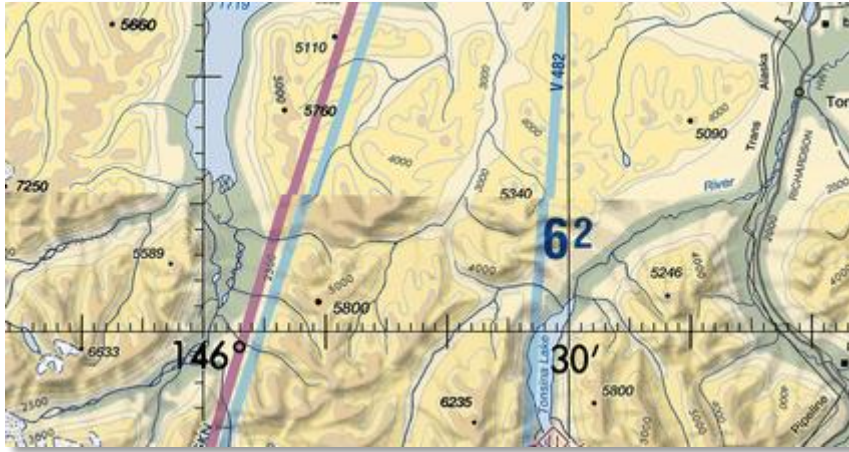


Рис. 31. Фрагмент склейки сборных карт м-ба 1:500 000 (faa.gov/air_traffic/)

Теневую отмывку применяют и на аэронавигационных картах в службе управления воздушным движением Сербии и Черногории SMATSA (SERBIA AND MONTENEGRO AIR TRAFFIC SERVICES) (рис. 32).



Рис.32. Уменьшенный фрагмент полетной карты аэродрома Подгорица, м-б 300 000 (smatsa.rs/)

Выводы. В результате анализа изображения рельефа на аэронавигационных картах большого количества служб аэронавигационной информации по всему миру было сформулировано несколько предложений по поводу дальнейшей магистерской работы.

В силу того, что главным элементом содержания аэронавигационных карт является собственно аэронавигационная информация, изображению рельефа на этих картах уделяется мало внимания, либо его не уделяется совсем, а между тем, рельеф в аэронавигации является важным элементом содержания карт, поскольку он служит для ориентирования и опознавания, определения безопасных высот пролета над местностью, четкого понимания аэронавигационной информации, планирования.

Основным способом изображения рельефа на аэронавигационных картах является способ изолиний с послойной окраской, однако в работе этот метод используется в сочетании с теневой пластикой, для более четкого представления визуальной структуры и организации рельефа местности.

Поэтому представляется важным уделить особое внимание изображению рельефа, чтобы элементы рельефа местности быстро и четко интерпретировались, особенно тогда, когда они являются существенными, а также чтобы изображение рельефа не перенасыщало карту и не мешало пониманию пилотом основных и существенных аэронавигационных данных.

Глава 2. Автоматизация в картографии. Геоинформационное обеспечение мультимасштабного картографирования для задач аэронавигации

2.1. Автоматизация в картографии

Технические возможности картографии в последнее время сильно изменились: появление специальных программных продуктов с огромным количеством модулей позволяет автоматизировать процессы картографирования и, как следствие, влечет за собой коренную перестройку картографического производства. Очевидно стремление к автоматизации составления сложных карт с широким привлечением разработок из области автоматизации в картографии. Для автоматизированного составления сложных карт зачастую необходимо расчленение всех картосоставительских процессов на элементарные операции, которые должны быть согласованы между собой.

В настоящее время карты составляются на компьютере. Повышается качество картографической продукции, сокращается время выполнения работы. Появилась возможность быстро обновить карту (Дышлюк...2012). Главной целью является комплексная автоматизация процессов изготовления карт, нуждающихся в систематическом и срочном выпуске, в регулярном обновлении и переизданиях (Основы геоинформатики, 2004).

Производительность современных компьютеров позволяет коренным образом изменить информационное обеспечение картографирования. С их помощью можно не только привлекать и использовать большие массивы данных, но и применять сложные математические методы в картосоставлении, которые способствуют дальнейшему развитию и совершенствованию исследований (Тикунов, 1997).

Первоочередная задача, возникающая в процессе картографирования, состоит в его информационном обеспечении, во многом определяющем научную достоверность, полноту и детальность содержания карт. В последнее время особенно широко стали привлекаться данные дистанционного зондирования. Важную проблему представляет оптимизация выбора видов и способов представления данных для реализации моделей.

2.2. Мультимасштабное картографирование – новое направление географической картографии

Стремительное развитие технологий сбора, хранения, обработки и визуализации данных на рубеже XX и XXI века привело к острой нехватке научных методов создания электронных карт, которые предназначены для отображения на экране компьютера.

Традиционные методы, прошедшие последнюю редакцию четверть века назад (Салищев, 1990), рассчитаны на то, что масштаб карты фиксирован, а ее охват в общем случае связан с масштабом. Эти ограничения позволяли уместить изображение требуемой детализации в пределы листа бумаги, размеры которого соответствовали бы условиям работы с картой — настольной, настенной, в развороте атласа и т.д. С тех многое поменялось, и бумага уже не является основным и единственным носителем картографической информации. Эти функции перешли к базам пространственных данных, цифровым и электронным картам.

Ограничение по охвату не свойственно цифровым данным и визуальным средам: любая территория может быть представлена с требуемой детализацией в едином покрытии и далее отображена на экране компьютера. Неважно, каков масштаб отображения — 1:50 000 или 1:5 000 000 — средства навигации обеспечат перемещение пользователя из одной области в другую, помогут найти нужную территорию по топонимам или координатам. Масштабные ограничения кажутся неестественными в интерактивной визуальной среде, где можно приближаться к интересующей территории, или отдаляться, для того чтобы обозреть целый регион, ожидая при этом, что произойдет генерализация изображения и станут видны объекты и закономерности, соответствующие масштабу отображения. Научные методы географической генерализации, геоинформационного картографирования и построения баз пространственных данных ждут своего перерождения в рамках нового направления географической картографии — мультимасштабного картографирования, которое способно снять масштабные и территориальные ограничения традиционного подхода.

Мультимасштабное картографирование (МК) — это создание и использование электронных карт, обеспечивающих представление объектов во множестве масштабов. Содержание подобных карт меняется в зависимости от масштаба, установленного пользователем в интерактивной среде просмотра. Переход между масштабными уровнями основан на принципах картографической генерализации и проявляется в изменении состава слоев, степени их подробности и типа локализации, способов изображения и оформления, топологических, сетевых отношений между объектами. Мультимасштабность позволяет варьировать и выбирать оптимальную детализацию карты, быстро и удобно переходить с одного уровня исследования на другой, извлекать и анализировать картографическую информацию необходимой степени обобщения, сравнивать информацию, полученную на разных уровнях детализации. МК позволяет расширить спектр масштабов географического исследования, а также сократить временные затраты и эргономические неудобства, возникающие при совместном использовании карт нескольких масштабов (Самсонов, 2011).

Обозначенная проблема представляется актуальной не только по причине опережения технологией научных методов картографирования, но и в свете реальной потребности

географии в мультимасштабных методах моделирования и картографирования географической среды. Исследования иерархических свойств объектов и пространственно-временной частотности явлений входят в число приоритетных задач современной географической науки.

Специфика МК обусловлена тесной связью электронной карты и базы данных, а также возможностью непосредственного доступа к инструментам ГИС-анализа и формирования пространственных и атрибутивных запросов к БД. При проектировании и составлении мультимасштабных карт необходимо обеспечить: наглядность изображения; его метричность, требуемую для визуального анализа; связь с исходной моделью в БД для выполнения математически точного ГИС-анализа; соответствие детализации изображения масштабу отображения карты; согласованную и последовательную смену оформления и детализации изображения при изменении масштаба (Самсонов, 2011).

2.3. Геоинформационное обеспечение баз данных цифровых моделей рельефа (ЦМР). Обзор источников данных для создания ЦМР

Вплоть до 90-х годов прошлого века основным источником количественной информации о рельефе являлись топографические карты. В середине 50-х годов прошлого века в фотограмметрии возникло новое направление – цифровое моделирование рельефа. В рамках этого направления основными носителями информации о рельефе стали цифровые модели высоты (ЦМВ) – дискретные двумерные функции высоты – используемые для расчетов цифровых моделей рельефа (ЦМР) – дискретных двумерных функций морфометрических характеристик (Флоринский, 2010).

ЦМР - средство цифрового представления 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефа) в виде трехмерных данных как совокупности высот или отметок глубин и иных значений аппликат (координаты Z) в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот, нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний (gisa.ru).

Основными источниками высотных данных о рельефе на данный момент являются (Самсонов, 2011):

1. Цифровые модели рельефа;
2. Цифровые и бумажные топографические карты;
3. Материалы дистанционного зондирования:
 - Аэро- и космическая съемка
 - Воздушное и наземное лазерное сканирование (ВЛС и НЛС)

4. Геодезические измерения на местности:

- Тахеометрическая съемка и нивелирование
- Спутниковое позиционирование.

Эти источники различаются по характеру и точности предоставляемых данных, а также методике их обработки, что определяет их применение в разных масштабах картографирования (Самсонов, 2011). Применительно к нашим масштабам картографирования разумным и наиболее приемлемым будет использование первого источника в силу его современности, общедоступности, простоте использования.

Различают четыре способа построения ЦМР (Самсонов, 2011):

- получение высотных отметок в узлах регулярной сетки, в вершинах квадратов или прямоугольников – создание матрицы высот;
- нерегулярное (случайное) размещение высотных отметок в узлах сети произвольных треугольников – такие данные обычно получают при съемках на местности;
- размещение высотных отметок вдоль горизонталей или изобат с определенным шагом, т.е. векторизация этих изолиний по карте;
- получение высотных отметок в точках пересечения горизонталей со структурными линиями рельефа – осями водоразделов, тальвегами и др., что дает возможность наиболее точно зафиксировать морфологию рельефа.

Из всех форматов ЦМР сегодня наибольшее распространение получили модели на регулярной прямоугольной сетке (сеточные, или растровые) и триангуляционные (TIN) модели. Первые отличаются простой, универсальной структурой, удобной для хранения и анализа. Вторые имеют более гибкую и экономичную структуру, которая может содержать произвольные точки, линии и полигоны, в частности, структурные линии. Основной характеристикой модели является ее разрешение — размер ячейки для растровой модели и наименьшее расстояние между узлами для триангуляционной (Самсонов, 2011).

Модели TIN не так широко доступны, как растровые модели поверхностей, и, как правило, их построение и обработка несколько дороже. Стоимость получения высококачественных исходных данных может быть достаточно высока, а обработка TIN, из-за сложности их структуры, несколько менее эффективна, чем обработка растровых данных. Сети TIN обычно используются для моделирования небольших областей с очень высокой точностью, например, в инженерных приложениях, где их использование позволяет проводить вычисления планиметрической площади, площади поверхности и объема. Поскольку узлы могут располагаться на поверхности неравномерно, TIN может иметь более высокое разрешение (resolution) в областях, где поверхность крайне неравномерна или нужна большая детализация, и более низкое разрешение в областях с однородной поверхностью

(Бахарев, 2012). В соответствии с этим, в работе в качестве исходных данных использовались растровые модели рельефа, находящиеся в свободном доступе.

Характеристика ЦМР, находящихся в свободном доступе

ETOPO1 — глобальная цифровая модель рельефа 2009 г. с разрешением 1' (около 1,85 км на экваторе), подготовленная Национальным центром геофизических данных США (NGDC) на основе глобальных, национальных и региональных источников данных, включая SRTM30, IBCAO (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) — Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана), JODC (Japan Oceanographic Data Center (JODC) — Центр океанографических данных Японии, предоставляющий модель 500-метрового разрешения на прибрежные акватории Японии.) и др. До недавнего времени (до выхода GEBCO 30 arc-second grid) это была наиболее детальная цифровая модель рельефа в свободном доступе, охватывающая всю территорию земного шара без «белых пятен», включая рельеф дна Мирового океана и Каспийского моря (Amante... 2009). Интересной особенностью ETOPO1 является то, что она предоставляется в двух вариантах: «Ice Surface» — с учетом постоянного снежно-ледового покрова и «Bedrock» — с вычетом постоянного снежно-ледового покрова. ETOPO1 доступна по адресу (ngdc.noaa.gov/mgg/global/).

GEBCO_08 — глобальная цифровая модель рельефа 2009 г. с разрешением 30'' (около 930 м на экваторе), предоставляемая Британским центром океанографических данных (BODC) и покрывающая территорию всего земного шара, включая сушу и Мировой океан, за исключением Каспийского моря. Это наиболее подробная модель рельефа дна Мирового океана. Рельеф дна акваторий интерполирован на основе данных эхолотирования с привлечением данных об аномалии силы тяжести и альтиметрии Geosat и ERS. Рельеф дна океана севернее 64° с.ш. интерполирован на основе карты IBCAO. Рельеф суши получен с использованием данных SRTM30, а на широтах севернее 60° с.ш. — GTOPO30. В 2014 году (12 января) вышла обновленная версия – GEBCO 30 arc-second grid. Она сопровождается растровым идентификатором, в каждой ячейке которого записана информация о том, фактическое или предполагаемое значение глубины хранится в ячейке ЦМР (gebco.net). В дальнейшем планируется также дополнить этот растровый идентификатор информацией, содержащей код для определения оригинального описания или съемки, на основе которой были получены данные о глубине. ЦМР доступна в разных форматах: netCDF, Esri ASCII raster и GeoTiff (gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data).

GTOPO30 — цифровая модель рельефа суши с разрешением 30", созданная в 1996 году Геологической съемкой США (USGS) при участии NASA, Японии, Мексики и Новой

Зеландии, а также международных организаций UNEP/GRID (United Nations Environment Programme/Global Resource Information Database (UNEP/GRID) — программа окружающей среды ООН/ Глобальная база данных информации о ресурсах) и SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) — научный комитет по исследованию Антарктики). Одними из основных источников данных для моделирования послужили карты DCW (Digital Chart of the World), и Международная карта мира масштаба 1:1 000 000. Привлекались также карты отдельных стран. Модель GTOPO стала одним из наиболее популярных источников данных для мелкомасштабного картографирования рельефа суши. Однако ее существенным недостатком является значительный разброс качества от территории к территории и низкая географическая достоверность отдельных областей, что обусловлено качеством исходных данных (lta.cr.usgs.gov/GTOPO30).

SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission) — цифровая модель рельефа суши с разрешением 3" (около 90 м на экваторе) и охватом от 56 ю.ш. до 60 с.ш. (80% площади суши), полученная NASA при участии NGA (National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) — Национальное агентство геопространственной разведки США) на основе данных радиолокационной съемки с шаттла «Эндевор» 11–22 февраля 2000 года. На территорию США разрешение модели составляет 1" (около 30 м). На остальную поверхность Земли доступны только данные SRTM3 с размером ячейки 90х90 м. До появления ASTER GDEM в 2009 г. SRTM была наиболее подробной ЦМР рельефа суши. Особенностью и недостатком модели является то, что исходные данные в процессе радиолокации «впитали» рельеф всех объектов на поверхности Земли: лес, дороги, инженерные сооружения и т.д., которые в ряде областей присутствуют в виде артефактов модели. Т.е. SRTM нельзя в полной мере назвать цифровой моделью рельефа земной поверхности. Однако с учетом существенной степени осреднения — 90 м — SRTM можно использовать как модель рельефа в средне- и мелкомасштабных исследованиях (1:200 000 и мельче) с некоторыми оговорками. В версии 2.0 SRTM30 усилиями NGA была очищена от артефактов, большая часть «белых пятен» была заполнена (в особенности, горные районы), а также была вычищена береговая линия и приведена к горизонту поверхность водных тел. Вместе с SRTM версии 2 поставляется маска полигональной гидрографии SWBD (SRTM Water Body Data). Текущая версия модели SRTM30 2.1 была представлена летом 2009 г. В ней были устранены артефакты севернее 50° с.ш., связанные с недостатками использовавшегося ранее метода интерполяции (Самсонов, 2010).

ASTER GDEM — новейшая цифровая модель рельефа суши с разрешением 30 м и охватом от 83 ю.ш. до 83 с.ш. (99% площади суши). GDEM была подготовлена NASA и Министерством экономики, торговли и промышленности Японии METI на основе данных

ASTER со спутника Terra (Дубинин, 2009). Презентация модели состоялась 29 июня 2009 г. GDEM стала первой ЦМР высокого разрешения, которая обеспечила полноценное покрытие приполярных областей суши. Несмотря на то, что формально разрешение модели в 3 раза лучше, чем у SRTM, фактическое разрешение модели часто составляет порядка 100-120 метров, на что указывает и официальная документация. Для создания ЦМР ASTER GDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных ASTER, насчитывающего 1,5 млн сцен. В 2011 году была создана улучшенная версия ЦМР – ASTER GDEM Version 2: добавлены новые сцены, исправлены ошибки. Для замены некорректных данных использованы другие ЦМР: SRTM, NED (National Elevation Dataset; USGS), CDED (Canada digital elevation data), Alyaska DEM (Самсонов, 2010). С 1 апреля 2016 года все снимки (около 3 млн) за более чем 16-летний период работы стали доступными пользователям без ограничений на использование (nasa.gov/feature/jpl/nasa-japan-make-aster-earth-data-available-at-no-cost). При соответствии реального разрешения заявленным 30 м GDEM может стать хорошей основой для крупномасштабного картографирования рельефа в диапазоне 1:50 000–1:100 000 (Глобальные...2015).

GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) – при сотрудничестве USGS и NGA была разработана обновленная версия GTOPO30. Эта новая модель рельефа поддерживается в трех разрешениях: 30 угловых секунд (около 1 км), 15 угловых секунд (около 500 м) и 7,5 угловых секунд (около 250 м). Эти наборы предоставляют данные о рельефе земной поверхности от 84°N до 90°S. На некоторые регионы (Гренландия и Антарктида) отсутствуют данные высокого разрешения (7,5 и 15 угловых секунд), поскольку такой уровень детализации отсутствовал в исходных данных для создания ЦМР. Дополнительное преимущество модели – стали доступны несколько новых растров для каждого уровня детализации: MIN (minimum), MAX (maximum), MED (median), MEA (mean), STD (standard deviation), DSC (systematic subsample). В основу GMTED2010 легли данные из 11 источников, основным из которых являлся SRTM Digital Terrain Elevation Data (pubs.usgs.gov/).

3 arc second 1°x1° DEM ([viewfinderpanoramas](http://viewfinderpanoramas.org)) – ЦМР с этого ресурса в большинстве своем основаны на данных с Shuttle Radar Topography Mission. Данные SRTM в формате HGT могут быть загружены с этого сайта, за исключением для некоторых горных и пустынных районов, где можно наблюдать ошибки данных (phase unwrapping error), а также для районов к северу от 60°20'N, где, как известно, данные SRTM отсутствуют. Для этих квадратов были использованы данные с других доступных источников с применением авторского метода корректировки, который описан в (viewfinderpanoramas.org/voidfill). По адресу (Hormann C., 2012) есть возможность ознакомиться с независимым обзором

выполненной работы. Основные источники данных: Россия - топографические карты масштаба 1:100 000, 1:200 000.

Выводы. В процессе изучения возможных вариантов получения цифровых моделей рельефа, было принято решение об использовании в работе растровых моделей ЦМР как наиболее приемлемыми в силу их современности, общедоступности, простоте использования. Выполненный обзор доступных ЦМР позволил определить возможность использования каждой из них применительно к выбранным масштабам картографирования.

Поскольку составление аэронавигационных карт осуществляется в нескольких масштабах, то одной из важных задач будет определение состава исходных ЦМР, образующих растровое покрытие, т.к. в случае рельефа эта задача становится достаточно неоднозначной и сложной.

Кроме этого, большие массивы данных требуют совершенствования методов автоматизации и поиска более эффективных методов использования, ускорения процесса создания карт, сокращения времени выполнения работы. Эта задача становится особенно актуальной при необходимости систематического и быстрого переиздания карт.

Пространственный охват соответствует территории покрытия издаваемых карт – вся территория РФ. Как уже было сказано ранее, карты издаются в нескольких масштабах, для которых и планируется составление покрытия.

В качестве основных исходных данных для составления в масштабе 1:500 000 использовалась готовая ЦМР SRTM30 - цифровая модель рельефа суши с разрешением 3'' (cell size = 0.0008333°, около 90 м на экваторе). Выбор этой модели в качестве основной объясняется тем, что, во-первых, она характеризуется хорошим пространственным разрешением, которое удовлетворяет нашему масштабу картографирования и, во-вторых, она прекрасно согласуется с данными из картографической базы данных отдела (КБД) (рис. 34):

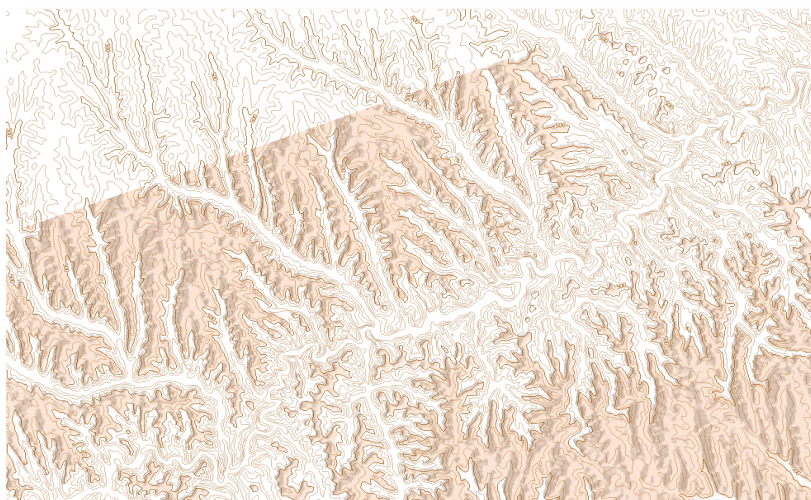


Рис. 34. ЦМР SRTM с горизонталями из КБД

Но, как уже было описано ранее, существуют ограничения по пространственному охвату данных: ЦМР доступна лишь в диапазоне от 56°ю.ш. до 60°с.ш. В связи с этим возникла задача, связанная с поиском данных для покрытия территории выше 60°с.ш. Поскольку пришлось столкнуться с использованием разнородных источников, полученных разными методами, потребуется их тщательное согласование, что представляет довольно серьезную проблему при формировании единых покрытий.

Были рассмотрены как другие доступные готовые ЦМР, характеристики которых были описаны в предыдущей главе, так и смоделированы новые ЦМР с помощью алгоритмов, имеющихся в программах ArcGIS и SAGA GIS.

В (Кошель, 2004) указано, что методы создания ЦМР можно разделить на 2 большие группы в зависимости от характера исходных данных: моделирование по данным в точках и моделирование по изолиниям. Там же приводится подробный обзор методов моделирования рельефа, среди которых автор выделяет метод кригинга и радиальной интерполяции, как дающие наилучшие результаты при построении растровых моделей.

Вначале была рассмотрена новейшая цифровая модель рельефа суши с разрешением 30 м (cell size = 0.00027778°) – ASTER GDEM (product of METI and NASA). Уже в работе (Самсонов, 2011) было указано на несоответствие фактического разрешения модели формальному. Несмотря на выпущенную в апреле 2016 года улучшенную, исправленную версию ЦМР, в ней еще встречаются ошибки и артефакты в данных (рис. 35, 36), на что, в частности, обращено внимание в сообщении при скачивании данных (использовать данные с осторожностью, METI\NASA не несет ответственности за ущерб, причиненный в результате их использования).

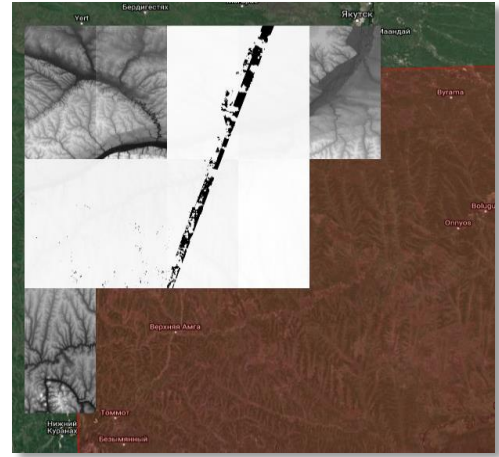


Рис. 35, 36. Aster GDEM



Рис. 37. DEM 3 arc second 1°x1° (viewfinderpanoramas.org/)

Из готовых решений еще была рассмотрена готовая ЦМР 3 arc second 1°x1° DEM (рис. 37) (viewfinderpanoramas.org/). Как было указано в описании модели в предыдущей главе, основными источниками данных на территорию России выше 60°с.ш. являлись топографические карты масштаба 1:100 000, 1:200 000. Соответственно использование топографических карт в качестве основных данных для моделирования рельефа обусловило хорошее согласование с другими элементами карты, в частности, с гидрографической сетью.

Кроме этого, ЦМР были смоделированы по данным из КБД отдела (рис. 39: площадная и линейная гидрография, горизонтали, высотные отметки) в программных продуктах ArcGIS и SAGA и проанализированы на предмет их возможного использования в дальнейшей работе. В ArcGIS рельеф был смоделирован алгоритмами TopoToRaster, Kriging, Spline interpolation, Natural Neighbor; в SAGA использовался алгоритм Universal Kriging.



Рис. 38. ArcGIS TopoToRaster (cell size = 0.0007°)

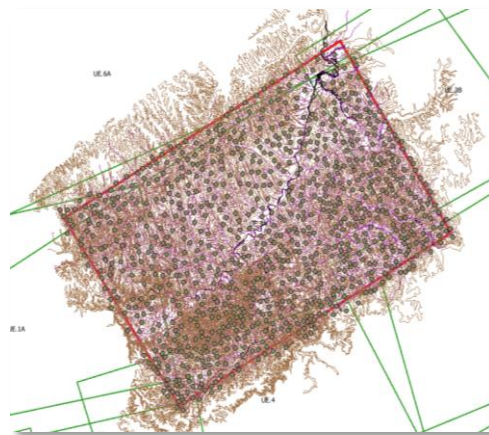


Рис. 39. Исходные данные для моделирования

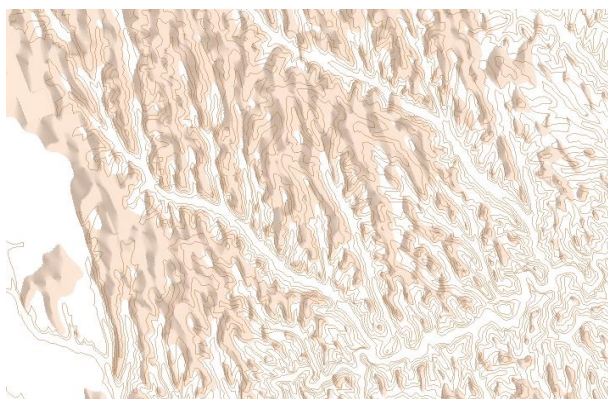


Рис. 40. SAGA Universal Kriging (cell size = 0.0008°)

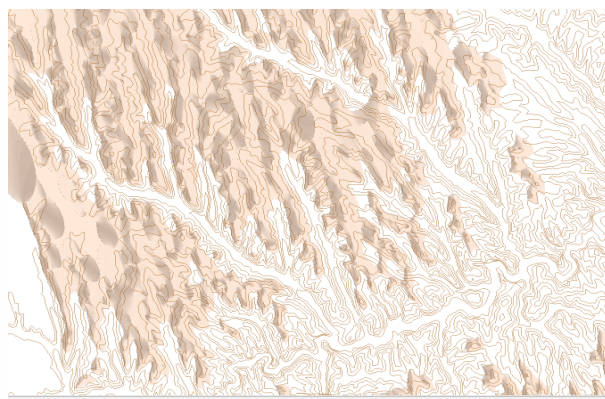


Рис. 41. ArcGIS Kriging (cell size = 0.0008°)

Очевидно, что ЦМР, построенная в ArcGIS алгоритмом TopoToRaster (рис. 38) обладает отличной согласованностью с другими элементами топографической основы, чем ЦМР, смоделированные с помощью других алгоритмов (рис. 40, 41). В том числе это можно объяснить и тем, что для моделирования рельефа алгоритмом TopoToRaster были использованы все доступные типы данных, как точечные, так и линейные, что нельзя сказать о других алгоритмах, которые способны работать лишь с точечными объектами.

С.М. Кошель в своей диссертационной работе, посвященной моделированию рельефа в ГИС (Кошель, 2004), указывает, что большинство блоков ГИС недостаточно оснащены методами моделирования. По его мнению, это может быть связано с тем, что разработчики ГИС (как правило, это американские фирмы) ориентируются на использование готовых ЦМР, что является существенным недостатком для российских пользователей, поскольку на территорию России такие модели отсутствуют. Пользователям приходится создавать их самим, причем основным и общедоступным источником данных о рельефе являются топографические карты.

Кроме визуальной оценки, был проведен сравнительный анализ всех ЦМР на основе определения оценки точности по разностям двойных равноточных измерений (Большаков, 1977):

$$m_d = \sqrt{\frac{[d^2]}{n}},$$

где m_d – средняя квадратическая ошибка разности, d – истинная ошибка разности, n – количество измерений (количество случайных точек).

Для анализа ЦМР была использована карта масштаба 1:500 000 из разграфки, по которой из картографической базы данных отдела были взяты данные для моделирования рельефа. Оценка точности проводилась по случайным точкам, построенным в QGIS в количестве 100 штук (рис. 41), по которым затем извлекались значения высоты из ЦМР в GIS SAGA. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

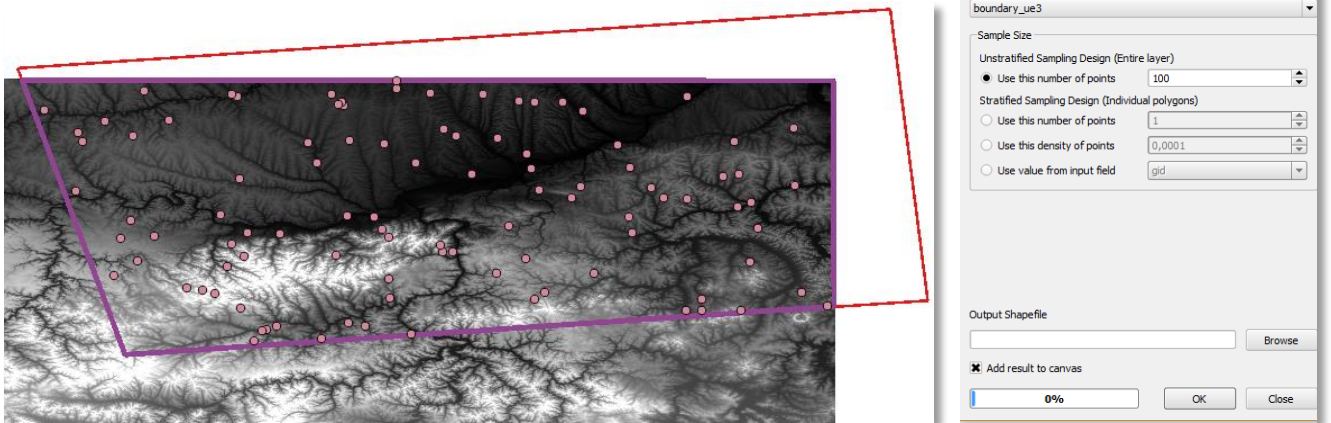


Рис. 41. Случайные точки (random points)

Таблица 1. Оценка точности по разностям двойных равноточных измерений

	Saga kriging	ArcGIS kriging	ArcGIS neighbour	ArcGIS spline	ArcGIS TopoToRaster	AsterGDEM	DEM (viewfinderpanoramas)
m_d	130,77	132,88	53,30	74,56	50,13	14,38	0,82

Как видно из таблицы, самые хорошие результаты оказались у ArcGIS TopoToRaster, AsterGDEM, DEM (viewfinderpanoramas.org/).

Аналогично проводились исследования ЦМР для составления карт более мелких масштабов. При этом в качестве исходных данных были взяты как готовые ЦМР, рекомендованные для использования в масштабах мельче 1: 1 000 000 (GMTED), так и генерализованные модели, которые дали лучшие результаты оценки точности.

В обеспечении данными для мультимасштабного картографирования генерализация играет большую роль. Применительно к изображению рельефа И.П. Заруцкой были сформулированы следующие требования (Заруцкая, 1958):

- сохранение на карте форм (положительных и отрицательных), типичных для изображаемого ландшафта;
- сохранение географического подобия изображаемых форм путем выделения характерных особенностей их рисунка;
- получение наглядности в изображении обобщенных форм, т.е. создание впечатления их выпуклости, объемности;
- сохранение определенной степени точности местоположения и высоты крупных форм.

Генерализация растров проводилась в ArcGIS с помощью модуля Resampling (методы nearest, bilinear, cubic, majority) (pro.arcgis.com/):

- NEAREST — минимизирует изменения значений пикселей, рекомендуется использовать для дискретных данных, (почвенно-растительного покров);
- BILINEAR — рассчитывает значение каждого пиксела как среднее (взвешенное) значение 4 соседних пикселей, подходит для непрерывных данных;
- CUBIC — вычисляет значение каждого пиксела как аппроксимацию по сглаженной кривой на основе окружающих 16 пикселей. Дает самое сглаженное изображение, но может создавать значения вне пределов диапазона исходных данных. Подходит для непрерывных данных;
- MAJORITY — определяет значение каждого пиксела на основе наиболее распространенного значения в пределах окна 3 на 3. Подходит для дискретных данных.

Таблица 2. Оценка точности по разностям двойных равноточных измерений

	GMTED mean	GMTED min	GMTED max	GMTED med	GMTED dsc	SRTM nearest	SRTM cubic	SRTM majority	SRTM bilinear
m_d	11,93	27,93	26,97	12,20	12,93	12,03	12,25	31,50	11,96

Судя по результатам, представленным в таблице 2, лучшие результаты оказались у GMTED (mean) и генерализованного SRTM методом bilinear.

Таким образом, были определены наиболее удовлетворяющие по точности ЦМР, которые будут использованы при формировании единой растровой основы для дальнейшего составления аэронавигационных карт.

3.2. Требования к изображению рельефа и разработка стилистики для изображения рельефа на аэронавигационных картах

3.2.1. Требования к изображению рельефа на картах

В общей теории картографии к изображению рельефа выдвигаются три основных требования (Берлянт, 2011):

- метричность изображения, обеспечивающая возможность получения по карте абсолютных высот и превышений, характеристик углов наклона, расчленения и др.;
- пластичность изображения, т.е. наглядная передача неровностей рельефа, формирующая у читателей зрительный образ местности;
- морфологическое соответствие изображения, что проявляется в стремлении подчеркнуть типологические особенности форм рельефа, его структурность.

Еще одним важным общим требованием, не относящимся только к рельефу, является геометрическая точность изображения, соответствующая масштабу карты.

Дополнительные требования к изображению рельефа, специфичные для геоинформационной среды, сформулированные (Самсонов, 2011):

- наглядность и пластика изображения;
- достаточная метричность изображения для визуального анализа;
- соответствие генерализации (степени подробности) изображения рельефа масштабу, в котором производится просмотр и анализ карты.

Применительно к аэронавигационным картам, изображение рельефа местности должно обеспечиваться посредством следующего метода: сглаженные горизонталы с указанием их значений и тональная гипсометрия в коричневом цвете. Благодаря чему обеспечивается визуальная структура и организация, которые делают возможным четкое, но в то же время приглушенное представление рельефа местности с выделением нанесенных аэронавигационных данных.

В таблице 3 приведены положения Приложения 4 ИКАО (Руководство, 2016) в отношении изображения рельефа на соответствующих аэронавигационных картах:

Таблица 3. Изображение рельефа на аэронавигационных картах

	МАРШРУТНАЯ КАРТА	КАРТА РАЙОНА	SID	STAR	ЗАХОД НА ПОСАДКУ ПО ПРИБОРАМ	ВИЗУАЛЬНЫЙ ЗАХОД НА ПОСАДКУ
	ППП-нет	ППП-рельеф для изображения местности и ситуационной осведомленности	ППП-рельеф для изображения местности и ситуационной осведомленности	ППП-рельеф для изображения местности и ситуационной осведомленности	ППП-рельеф для изображения местности и ситуационной осведомленности	ПВП-рельеф для визуальной навигации
РЕЛЬЕФ МЕСТНОСТИ		Важные с точки зрения эксплуатации особенности рельефа следует изображать посредством сглаженных горизонталей с использованием тональной гипсометрии в коричневом цвете, начиная с 300 м над превышением основного аэродрома	Важные с точки зрения эксплуатации особенности рельефа следует изображать посредством сглаженных горизонталей с использованием тональной гипсометрии в коричневом цвете, начиная с 300 м над превышением аэродрома	Важные с точки зрения эксплуатации особенности рельефа следует изображать посредством сглаженных горизонталей с использованием тональной гипсометрии в коричневом цвете, начиная с 300 м над превышением аэродрома	1) Должны изображаться элементы рельефа. 2) Если рельеф отвечает критериям п. 11.7.2, то все элементы рельефа должны изображаться посредством сглаженных горизонталей с использованием тональной гипсометрии в коричневом цвете, начиная со 150 м над превышением аэродрома.	Должны изображаться элементы рельефа. Более подробное изображение элементов рельефа, чем на карте захода на посадку по приборам. Обобщение элементов рельефа сглаженными горизонталями может быть нецелесообразным.

3.2.2. Разработка стилистики для изображения рельефа на аэронавигационных картах и пространственная фильтрация

Основой для разработки стилистики служила схема районирования территории СССР по высоте сечения рельефа и шкале гипсометрической окраски, в соответствии с которой были выделены районы с послойной окраской от 500, 700, 1000 и 2000 метров:

Отмывка представляет собой очень эффектный и выразительный прием светотеневого изображения, который в сочетании с послойной окраской дает наилучшую пластику рельефа. Поскольку в настоящее время отмывка выполняется компьютерными методами на основе анализа ЦМР, то к ее названию принято добавлять слово «аналитическая». Аналитическая отмывка очень проста в реализации и оперативна в исполнении, однако часто дает достаточно безразличное к типам рельефа изображение и сильно зависит от качества ЦМР. Способ выполнения аналитической отмывки выглядит следующим образом: в каждой элементарной ячейке исходной ЦМР автоматически рассчитываются углы наклона, в соответствии с которыми получается новый растр, создающий в результате эффект тени.

Теневая пластика рельефа на картах создается при условии зенитального, бокового или комбинированного освещения. В картографической практике принято северо-западное освещение. Это связано с традиционным и наиболее удобным положением источника света при чтении, черчении и т.п., когда свет падает слева (или сверху). А наибольшая пластичность при северо-западном освещении достигается при высоте источника света около 30° (Лосяков, 1986). Наиболее популярный вариант — комбинация бокового и отвесного освещения. Первое подчеркивает простирающие формы рельефа, второе — линии хребтов и тальвегов (Востокова...2002).

В работе отмывка была построена при двух вариантах освещения: как сочетание отвесного освещения с боковым с целью получения наиболее пластичного изображения рельефа (рис. 45, 46).

В современных ГИС аналитическая отмывка выполняется с помощью инструмента hill shading. Таким образом, растр ЦМР был загружен в программу QGIS и с помощью вышеуказанного инструмента были построены 2 растра отмывки с углами наклона 300° и 90° (рис. 47, 48):

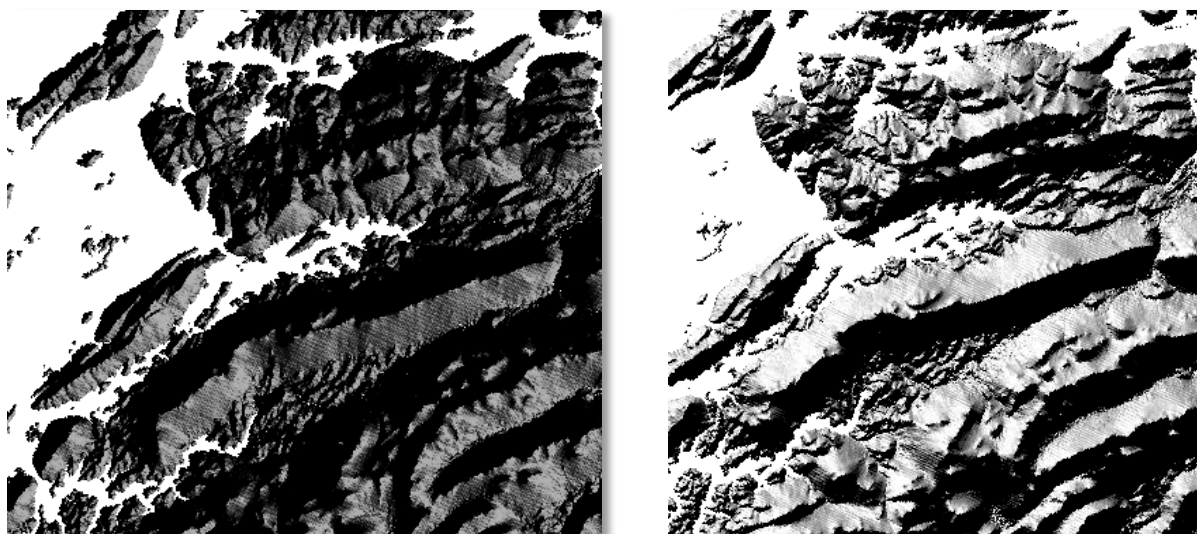


Рис. 47, 48. Растр теневого рельефа при отвесном и боковом освещении (Южный Урал, м-б 1:500 000)



Рис. 49. Результат наложения растров при боковом и отвесном освещении с послойной окраской

Далее предстоял этап генерализации (пространственной фильтрации) ЦМР с целью устранения шумов и выделения более крупных структур. Как видно из рис. 50, данный этап был совершенно необходим, поскольку создается слишком «зерненное» изображение.

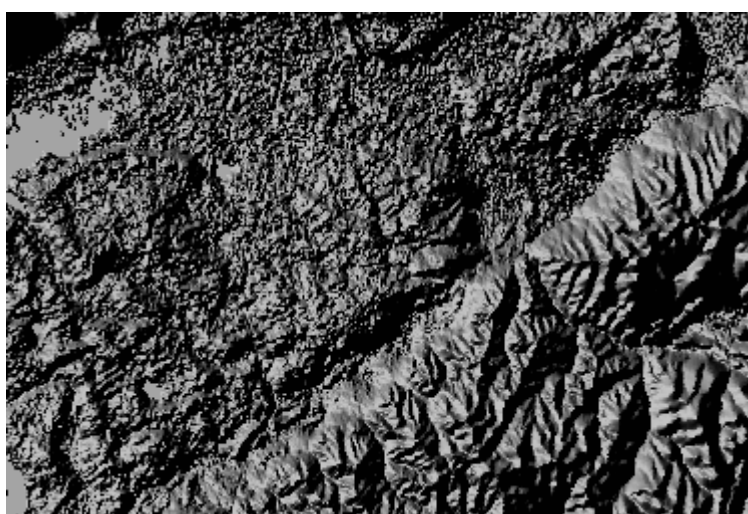


Рис. 50. Фрагмент исходного растра

Ознакомившись с типами фильтров в (Шовенгердт, 2010), я остановила свой выбор на фильтре низких частот (ФНЧ), который сохраняет локальное среднее значение и сглаживает входной сигнал. При этом чем больше окно (размер окрестности), тем больше уровень сглаживания, выделяются все более крупные структуры, а мелкие структуры теряются.

Реализация данного способа фильтрации была осуществлена в SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) GIS, ПО с открытым исходным кодом. Разработанная в конце 1990-х на кафедре физической географии факультета геологических наук и географии Гёттингенского университета, она фокусируется в основном на анализе ЦМР как для

прогнозирования свойств почв, так и для динамики физико-географических процессов, связанных с рельефом, а также некоторых климатических параметров (Свидзинская Д., 2012). Научное обоснование работы каждого фильтра, применяемого к ЦМР, может в полной мере являться темой отдельного исследования, поэтому подробного описания работы каждого фильтра с анализом результатов в работе не приводится. С перечнем и возможностями работы каждого фильтра в ГИС SAGA можно ознакомиться в его официальной документации, доступного по адресу (saga-gis.org/saga_module_doc/).

В работе был использован Gaussian Filter: сглаживающий фильтр для «размывания» растровых данных и удаления мелких деталей и шумов. Степень сглаживания определяется величиной стандартного отклонения и размером радиуса сглаживания (saga-gis.org/saga_tool_doc/).

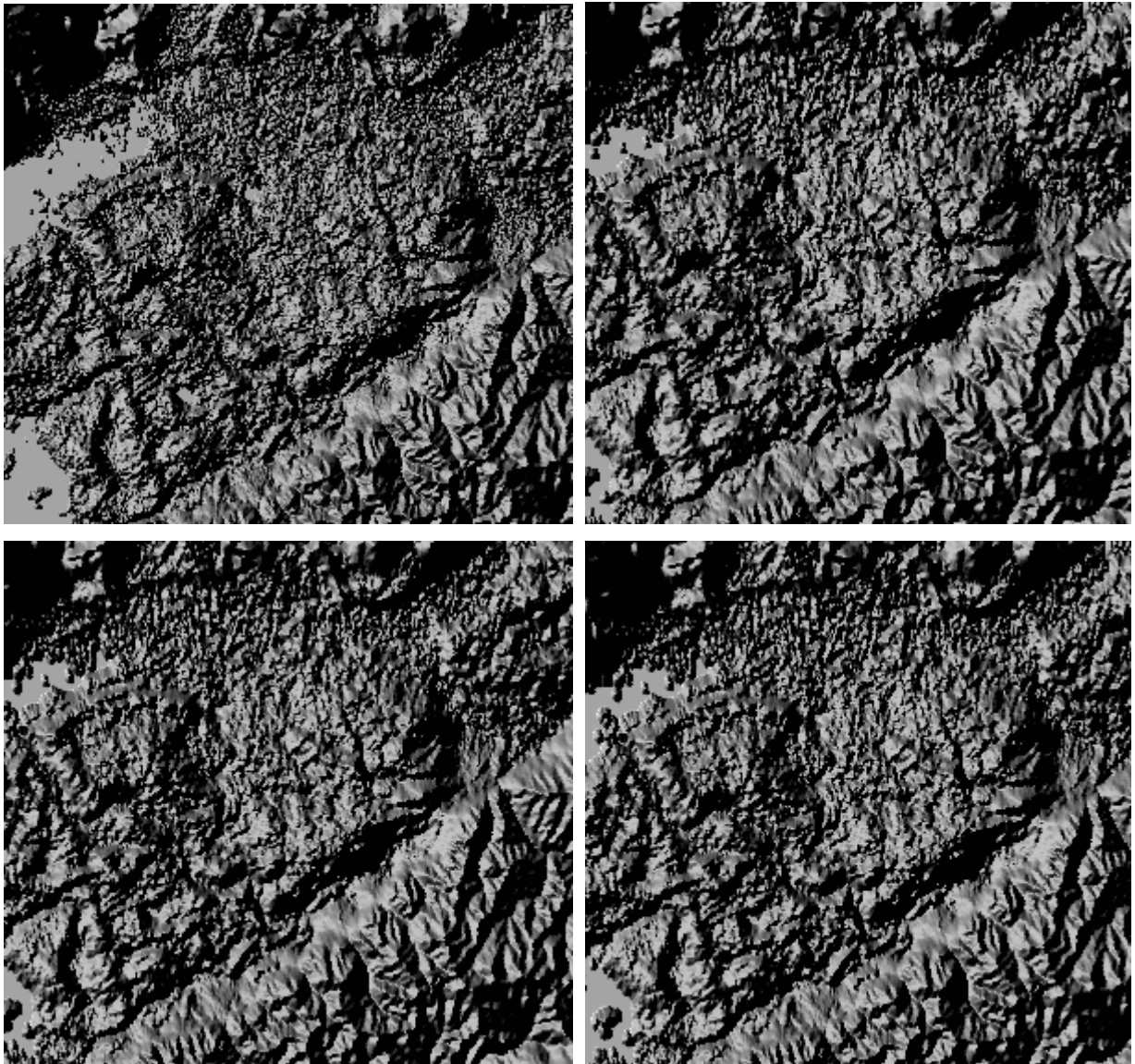


Рис. 51. Фрагменты растра до и после фильтрации с размерами скользящего окна (по часовой стрелке): до фильтрации, 3x3, 5x5, 7x7; М-б 1:500 000

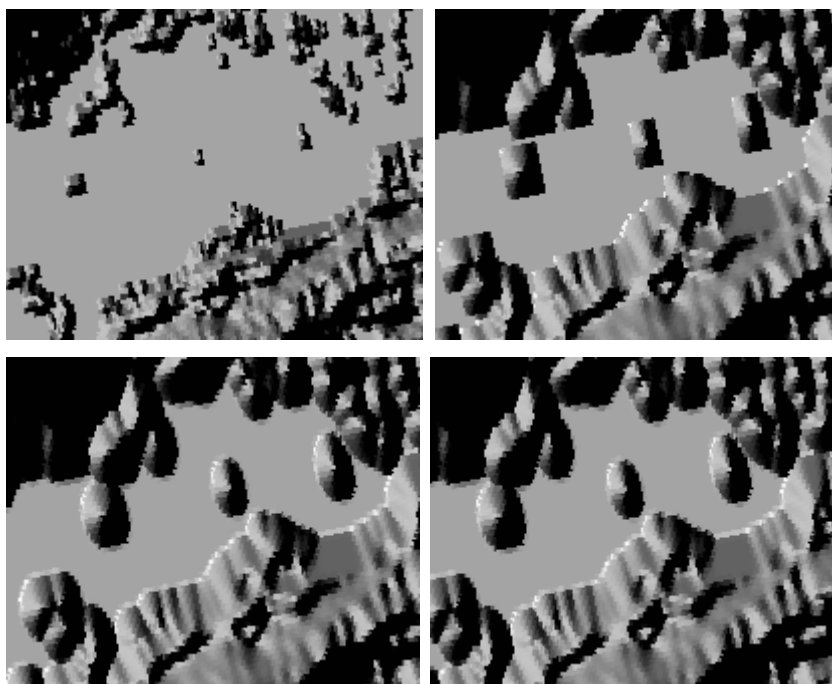


Рис. 52. Фрагменты растра до и после фильтрации (увеличенный фрагмент) с размерами скользящего окна (по часовой стрелке): до фильтрации, 3x3, 5x5, 7x7; М-б 1:125 000

Из рис. 51, 52 видно, что наибольшего положительного эффекта с применением низкочастотного фильтра можно добиться с размером скользящего окна 5x5.

Использование фильтра с меньшим размером окна дает положительные результаты, но рисунок изображения (особенно это заметно на границе высоты 500 метров и краях растра) все же еще представляет собой довольно зернистый характер.

Увеличение же размера окошка уже практически не дает результатов.

Выводы. Проведенные исследования ЦМР, основанные на анализе рассмотренных в предыдущей главе (из свободного доступа) и смоделированных алгоритмами ArcGIS и SAGA GIS позволили определить набор исходных данных для формирования единого растрового покрытия для составления аэронавигационных карт необходимых масштабов.

Тщательное согласование данных, вызванное использованием разнородных источников, составило серьезную проблему при составлении мультимасштабной растровой основы с рельефом. Данное обстоятельство потребовало проведение как визуальной оценки данных, так и сравнительного анализа всех ЦМР на основе определения оценки точности по разностям двойных равноточных измерений.

В целях устранения шумов и выделения более крупных структур после формирования покрытия была выполнена пространственная фильтрация данных.

Важным этапом в работе была разработка стилистики для изображения рельефа, которая основывалась на изложенных требованиях приложения 4 ИКАО (Руководство, 2016) к изображению рельефа на аэронавигационных картах и схеме районирования территории СССР по высоте сечения рельефа и шкале гипсометрической окраски. Для повышения пластичности изображения рельефа было применено сочетание аналитической отмывки с послойной окраской. В работе отмывка была построена при двух вариантах освещения: как сочетание отвесного освещения с боковым с целью получения наиболее пластичного изображения рельефа.

Глава 4. Хранение растровых данных и обеспечение доступа к ним

Следующим этапом в работе был выбор хранилища данных, поскольку одной из задач было обеспечение быстрого доступа к данным и уменьшения времени работы по выгрузке карты.

Есть три способа хранения растровых данных: в виде файлов в файловой системе, в базе геоданных или хранение в файлах с управлением из базы геоданных. При выборе способа хранения также следует определить, будут ли храниться все данные в едином наборе растровых данных или в каталоге, в котором можно разместить большое количество растровых наборов данных (desktop.arcgis.com/).

При этом хранение растровых данных в базе геоданных предпочтительнее в случае, если есть необходимость управления наборами растровых данных, отслеживания поведения, контроля над схемой, а также если требуется единая архитектура для управления всем содержанием.

Термин "набор растровых данных" обозначает любую модель растровых данных, хранящуюся на диске или в базе геоданных. Это самая распространенная модель хранения растровых данных, на которой построены другие – наборы данных мозаики. Набор растровых данных – любой поддерживаемый растровый формат, организованный в один или несколько каналов. Каждый канал состоит из массива пикселей (ячеек); каждый пиксел имеет некоторое значение. Набор растровых данных имеет как минимум один канал.

Набор данных мозаики – совокупность наборов растровых данных (изображений), хранящаяся как каталог и отображаемая как единое мозаичное изображение или отдельные изображения (растры). Наборы данных мозаики могут быть очень велики, как по размеру файла, так и по количеству наборов данных. Наборы растровых данных в наборе данных мозаики могут оставаться в исходном формате на диске или, при необходимости, загружаться в базу геоданных. Данные в наборе данных мозаики не обязательно должны быть смежными или перекрывающимися, но могут существовать как не соединенные, прерывающиеся наборы данных.

Определяющим обстоятельством в выборе способа хранения и представления растровых данных при составлении аэронавигационных карт был тот факт, что по сути отсутствует необходимость анализа, управления наборами растровых данных. Основной задачей было обеспечение быстрого доступа к растровым данным, уменьшение занимаемого большими массивами растровых данных места на сервере и увеличение производительности при составлении карт и выводе их на печать. Кроме этого, наборы растровых данных

занимали достаточно много (десятки Гб) дискового пространства на локальных компьютерах, что тормозило весь производственный процесс.

Изначально в качестве основополагающей рассматривалась идея хранения растровых данных в базе данных PostgreSQL, а точнее в ее расширении PostGIS, позволяющей явно хранить пространственно-координированные объекты. Для работы с растрами (в том числе для проведения пространственного анализа и обработки растровых данных) в PostGIS был введен новый тип данных PostGIS raster, который позволяет хранить растровые данные в двоичном формате в PostgreSQL, подобно хранению векторных данных.

Для загрузки растров в PostGIS используется команда raster2pgsql.py, с помощью которой можно загрузить любой растр, поддерживаемый библиотекой GDAL (TIFF, JPEG, DEMS, PNG, GIF, ArcGIS ASCII grid files...) (Obe...2011). При загрузке больших массивных покрытий рекомендуется индексировать и разбивать растр на пирамиды, что однако не увеличивает скорость отрисовки, а наоборот, делает пространственную базу данных громоздкой и трудноуправляемой. В связи с этим возникла необходимость поиска альтернативного варианта хранения растров.

Затем на смену этим соображениям пришло совершенно неожиданное решение – представить тяжелое растровое покрытие в виде блоков пикселей (тайлов), которые хранились бы на сервере и доступ к которым осуществлялся непосредственно из QGIS с помощью плагина. Идея разбиения больших массивов данных на тайлы для повышения производительности не нова, такой подход используется во многих картографических сервисах, где требуется подгружать картографические изображения (карты Google, OpenStreetMap, OpenCycleMap, OpenSeaMap, Hillshading (рис. 53, 54) (en.wikipedia.org/wiki/Tiled_web_map).

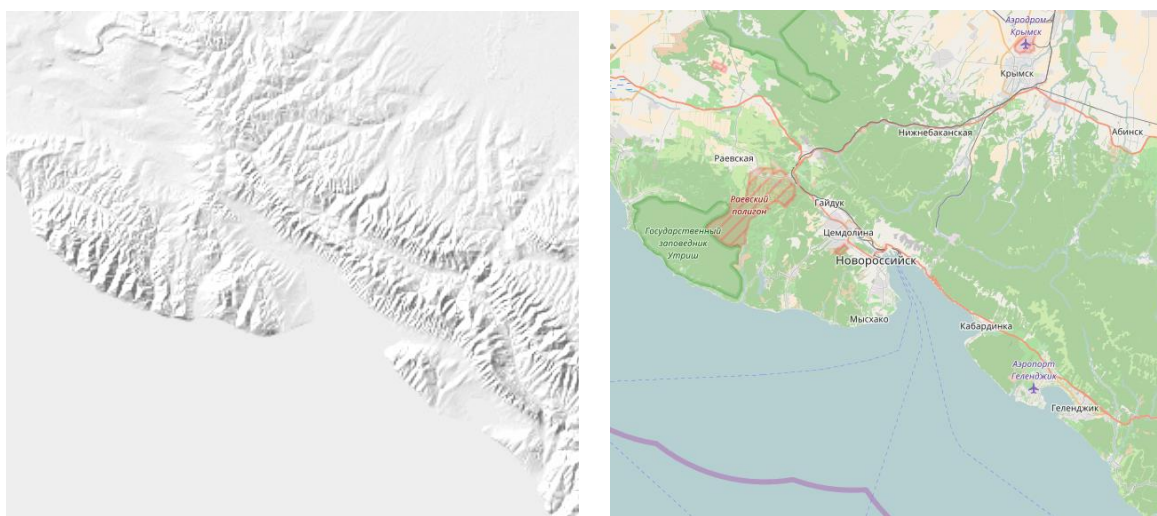


Рис. 53, 54. Hillshading SRTM3 map VS OSM Mapnik (wiki.openstreetmap.org/wiki/Tiles)

Поскольку создание и визуализация изображения является ресурсоемкой операцией как по количеству времени, так и по интенсивности работы процессора, то в работе таких приложений предусмотрено кэширование сгенерированных изображений, которое создается путем нарезки карты на сегменты с их визуализацией по мере необходимости и склейкой для получения целой карты.

Каждый тайл представляет собой изображение формата jpeg или png и хранится в файле с уникальным именем, которое определяется масштабом (zoom) и координатами этого тайла по осям X и Y, при этом X начинается от 0 (что соответствует 180° W) до $2^{\text{zoom}} - 1$ (180° E), а Y имеет значения от 0 (85.0511° N) до $2^{\text{zoom}} - 1$ (85.0511° S) в Меркаторской проекции (Web Mercator). Таким образом в установленных границах, исключая приполярные области, весь земной шар в этой проекции изображается огромным квадратом (zoom level = 0) (wiki.openstreetmap.org/wiki/Slippy_map_tilenames, maptiler.org/, msdn.microsoft.com/). На рис. 55. представлена схема тайловой структуры:

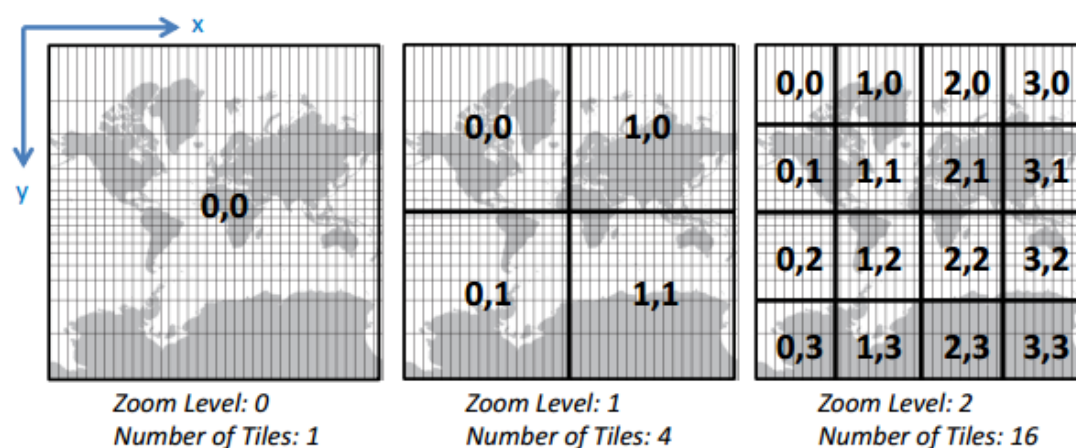


Рис. 55. Наиболее распространенный вариант тайловой структуры, используемый в том числе на картах Google Maps: представлены первые три масштабных уровня, тайлы и их нумерация в соответствии с правилом нумерации Google Maps / OpenStreetMap XYZ (Stefanakis, 2015)

Стандартный размер тайла составляет 256×256 пикселей. Количество тайлов, из которого состоит изображение, находится в прямой зависимости от масштаба: zoom level = 2^{2n} tiles (табл. 4):

Таблица 4. Зависимость масштабного уровня от количества тайлов
(wiki.openstreetmap.org/wiki/Slippy_map_tilenames)

zoom level	tile coverage	number of tiles	tile size(*) in degrees
0	1 tile covers whole world	1 tile	360° x 170.1022°
1	2 × 2 tiles	4 tiles	180° x 85.0511°
2	4 × 4 tiles	16 tiles	90° x [variable]
n	$2^n \times 2^n$ tiles	2^{2n} tiles	$360/2^n$ ° x [variable]
12	4096 x 4096 tiles	16 777 216	0.0879° x [variable]
16		$2^{32} = 4\,294\,967\,296$ tiles	
17		17 179 869 184 tiles	
18		68 719 476 736 tiles	
19	Maximum zoom for Mapnik layer	274 877 906 944 tiles	

Использование тайловой структуры позволяет при просмотре загружать не всё изображение целиком (а оно может быть действительно огромным), а только ту его часть, которая отображается на экране, что позволяет значительно экономить время и ресурсы компьютера.

Концепция «скользящей карты» («Slippy map») представляет собой масштабируемую карту, где пользователь в интерактивном режиме имеет возможность передвигать и прокручивать карту в разные стороны и двойным нажатием увеличивать ее масштаб. В настоящее время скользящие карты стали чрезвычайно популярными вследствие значительного увеличения производительности при работе с приложением и уменьшения трафика.

Таким образом, применение тайловой структуры при работе с тяжелыми массивами ЦМР позволит значительно сократить место на сервере и повысить производительность работы. Поскольку масштабы составляемых аэронавигационных карт, для которых и разрабатывалось растровое покрытие, находятся в пределах 1:500 000 – 1:3 000 000, масштабные уровни тайлового покрытия установились в диапазоне zoom 7 – 11, которые были определены в соответствии с рис. 55:

Таблица 5. Соотношение масштабного уровня и масштаба карты (wiki.openstreetmap.org/wiki/Zoom_levels)

Level	~ Scale
0	1:500 million
1	1:250 million
2	1:150 million
3	1:70 million
4	1:35 million
5	1:15 million
6	1:10 million
7	1:4 million
8	1:2 million
9	1:1 million
10	1:500,000
11	1:250,000
12	1:150,000
13	1:70,000
14	1:35,000
15	1:15,000
16	1:8,000
17	1:4,000
18	1:2,000
19	1:1,000

Нарезка растровых изображений на тайлы проводилась с помощью плагина QTiles, который позволяет создавать тайлы непосредственно из проекта QGIS – что является его большим преимуществом, по сравнению с другими решениями (gdal2tiles, MapTiler). Назначение инструмента — автоматизация создания многоуровневого кэша тайловых фрагментов в соответствии со спецификацией Slippy Map и TMS (Tile Map Service). Плагин доступен из официального репозитория (plugins.qgis.org/plugins) и для своей работы не требует наличия дополнительных модулей. Окно при запуске модуля представлено на рис. 56:

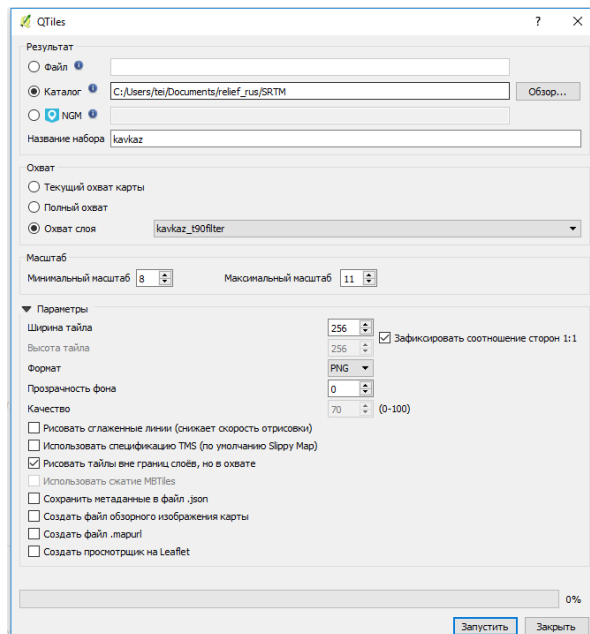


Рис. 56. Главное окно при запуске плагина QTiles с выставленными параметрами

В результате выполнения работы алгоритма получается тайловый набор установленных масштабов.

Подключение тайлового набора в проект QGIS с картой осуществляется с помощью плагина TileLayer Plugin (github.com/minorua/TileLayerPlugin). Ограничения в работе модуля связаны с именами тайлов, которые должны соответствовать спецификации Slippy map и их размером, равным строго 256 x 256 пикселей. Указывая определение тайлового набора (слоя) в файл формата .tsv (tab separated value), где каждая строка содержит информацию о слое, пользователь в дальнейшем может обращаться к этому тайловому набору и подгружать соответствующие слои в окно карты.

Формат записи файла определения слоя:

Title attribution url yOriginTop zmin zmax xmin ymin xmax ymax

Обязательными полями являются заголовок и путь до тайлов, а остальные поля являются опциональными (yOriginTop - начало отсчета тайлов, где 1 соответствует отсчету от верхнего левого угла (Slippy Map, это значение используется по умолчанию), а 0 соответствует отсчету от нижнего левого угла (TMS); минимальный и максимальный масштабы (zmin и zmax, по умолчанию zmin=0, zmax=18); охват слоя в градусах (xmin, ymin, xmax, ymax, при этом ymin и ymax могут принимать значения в диапазоне от -85.05 до 85.05, что и соответствует «огромному квадрату» в проекции Web Mercator)).

Примеры (github.com/minorua/TileLayerPlugin):

freetilemap.tsv

RoadMap FreeTileMap <http://freetilemap.example.com/road/{z}/{x}/{y}.png>

slope.tsv

slope :///d:/tilemaps/slope/{z}/{x}/{y}.png 0 6 13 130.5
33.6 135.0 36.0

С более подробными характеристиками работы модуля можно ознакомиться в (github.com/minorua/TileLayerPlugin).

Следующий этап был связан с обеспечением комфортной работы с подготовленной растровой основой, а именно расчетом границ всех карт и записью в .tsv файл для подгрузки тайлов, относящихся к конкретной карте. Это, в свою очередь, увеличит скорость отрисовки и доступа к тайлам, поскольку не будет необходимости каждому картографу в своем проекте с картой прогружать тайлы на всю Россию.

Для этого все двусторонние карты были объединены в один полигон для указания общей границы (рис. 57):

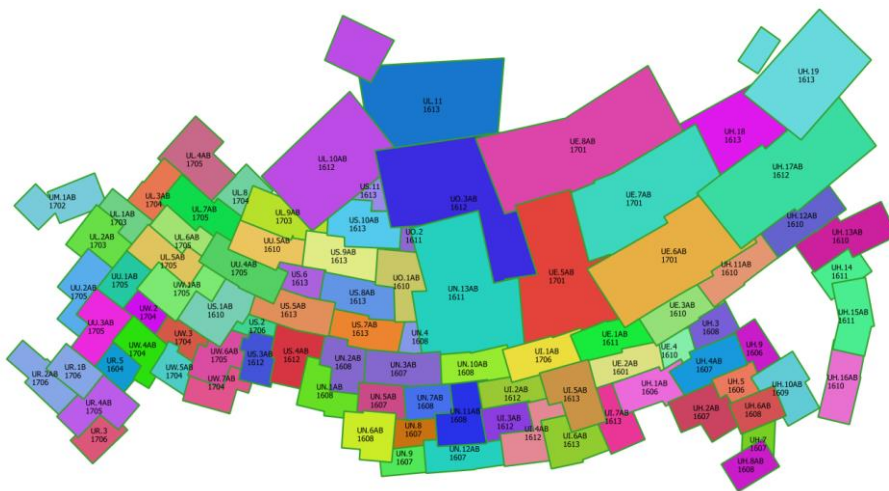


Рис. 57. Ограничивающие рамки двусторонних карт

В QGIS был выполнен пространственный запрос со слоем отметок высот для выбора карт, которые в принципе имеют высоты больше 500 метров и для которых актуально составление карт с отмывкой (рис. 58):

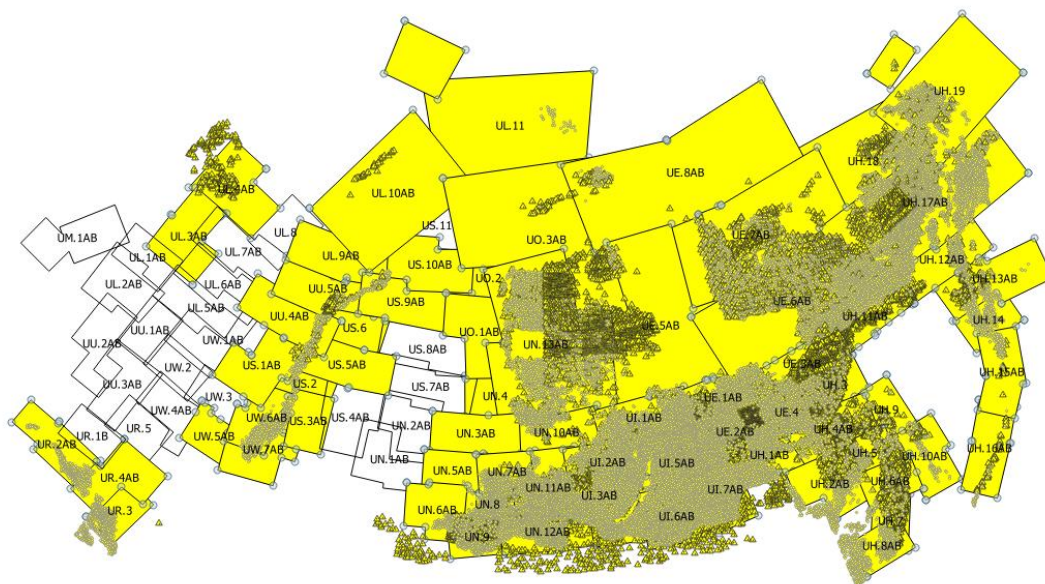


Рис. 58. Результат пространственного запроса

Затем с помощью калькулятора полей (рис. 59) были рассчитаны крайние точки ограничивающих рамок выбранных карт в соответствии с форматом BoundingBox (wiki.openstreetmap.org/wiki/Bounding_Box):

`bbox = left,bottom,right,top`

`bbox = min Longitude , min Latitude , max Longitude , max Latitude`

```
floor(x_min($geometry)) || ' ' || floor(y_min($geometry)) || ' ' || ceil(x_max($geometry)) || ' ' || ceil(y_max($geometry))
```

Рис. 59. Выражение в калькуляторе полей для расчета границ карт

Полученные результаты использовались при создании .tsv файлов для указания их пространственного охвата (рис. 60):

new 0 x	UHmaps500.tsv	
1	UH.1AB	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 119 51 132 56
2	UH.2AB	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 126 47 135 53
3	UH.3	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 132 55 142 59
4	UH.4AB	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 128 51 140 56
5	UH.5	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 132 49 141 53
6	UH.6AB	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 133 46 141 50
7	UH.7	C:/Users/tei/Documents/TILES/500t_nonret/{z}/{x}/{y}.png 1 0 11 132 42 139 49

Рис. 60. Вид записей в .tsv файле

Инструкция по добавлению тайлового набора с рельефом на карту в QGIS:

- 1) Установить плагин TileLayerPlugin;

- 2) Добавить в папку layers установленного плагина на персональном компьютере файлы описания слоев .tsv;
- 3) В окне программы QGIS во вкладке Интернет выбрать Add Tile Layer и добавить необходимый слой.



Рис. 61. Тайловый набор с рельефом в QGIS

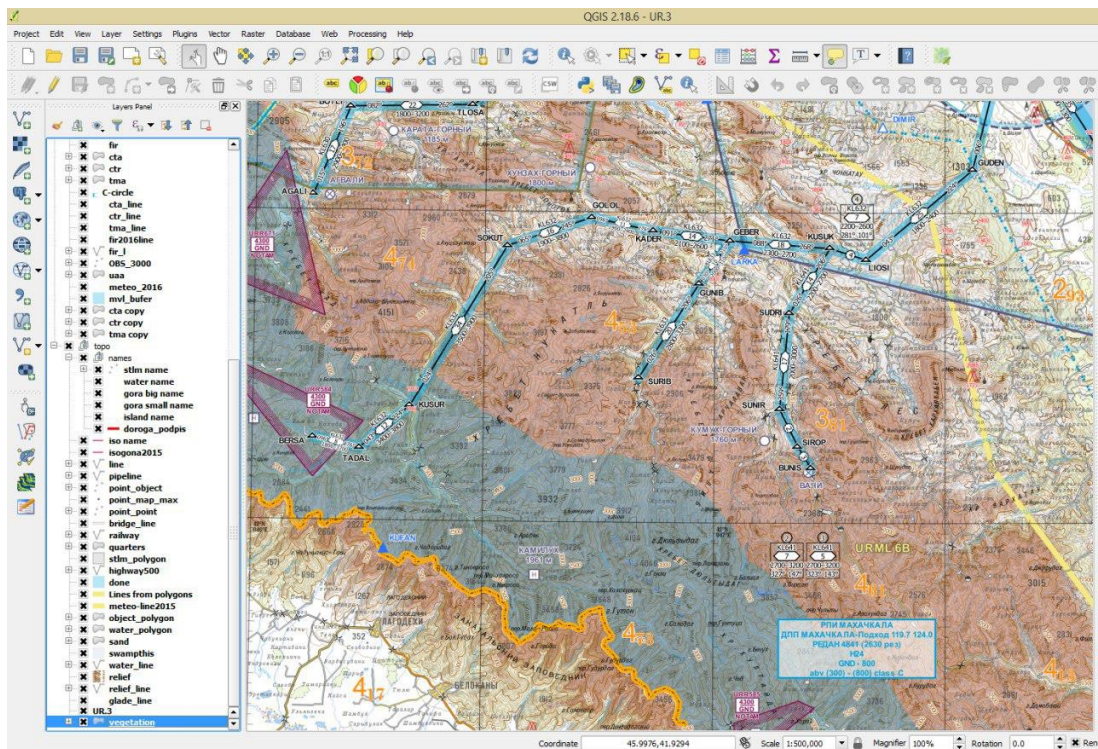


Рис. 62. Составление карты в предложенной инструкции

Заключительным этапом в работе была обработка тайлов, а именно удаление полностью прозрачных тайлов и их сжатие.

Проблема состояла в следующем: при генерации тайлов с рельефом на территорию России было создано большое количество прозрачных тайлов, которые соответствуют равнинным областям с высотами до 500 метров, для которых не предусмотрено составление карт с отмывкой (рис. 63):

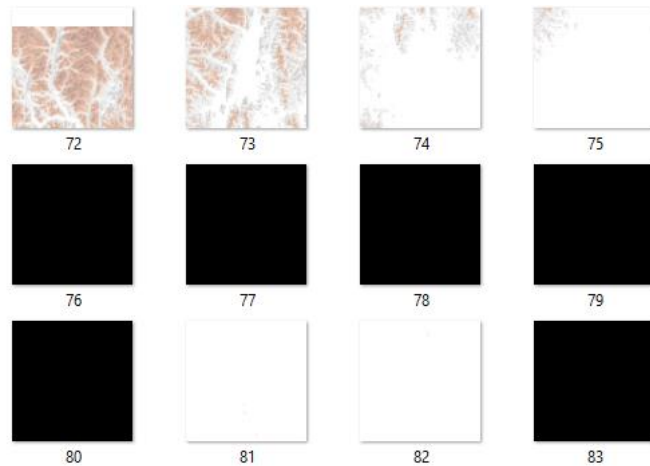


Рис. 63. Сгенерированные тайлы

Несмотря на их малый вес (каждый прозрачный тайл весил около 20 КБ), при их большом количестве это становится значительно. Поэтому после генерации тайлов было запланировано составление функции на языке Python для их удаления.

Принцип работы кода: на вход дается директория с вложенными по папкам (zoom, x) тайлами. В ходе работы Python обращается к каждому тайлу и попискельно анализирует их, считая количество прозрачных пикселей в каждом тайле. Поскольку заранее известно, что размер каждого тайла строго равен 256 пикселей по широте и высоте, становится несложным определить условие для удаления полностью прозрачного тайла из каждой папки. При этом, при наличии в папке только прозрачных тайлов, после их удаления сама пустая директория также удаляется. В результате выполнения процедуры фрагмент содержимого папки, изображенного на рис. 63 приобретает следующий вид (рис. 64):

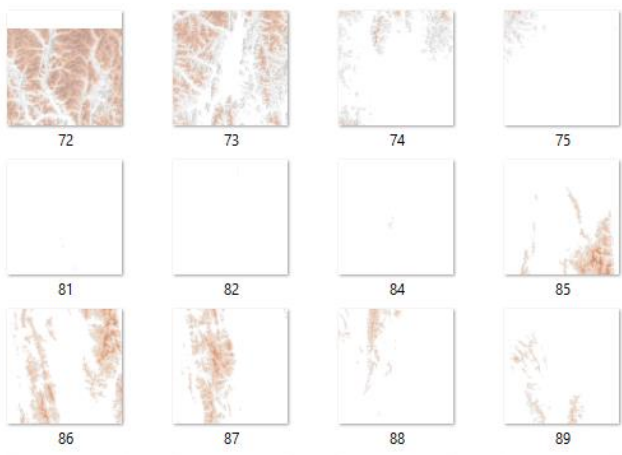


Рис. 64. Вид директории с тайлами после удаления прозрачных тайлов

Код составленной исполняемой функции `def delete_transp_tiles` представлен на рис. 65:

```
def delete_transp_tiles(transp_dir):
    #transp_dir = r'C:\Users\tei\Documents\relief_rus\SRM\srtm'
    list_zoom = os.listdir(transp_dir)
    for zfolder in list_zoom:
        path_to_z = os.path.join(transp_dir, zfolder)
        list_x = os.listdir(path_to_z)
        for xfolder in list_x:
            path_to_x = os.path.join(path_to_z, xfolder)
            list_tiles = os.listdir(path_to_x)
            for tile in list_tiles:
                path_to_tile = os.path.join(path_to_x, tile)
                img = (Image.open(path_to_tile)).convert('RGBA')
                pixels = img.load()
                width, height = img.size
                all_pixels = []
                for x in range(width):
                    for y in range(height):
                        cpixel = pixels[x,y]
                        all_pixels.append(cpixel)
                pixel = Counter(all_pixels)
                if pixel[0, 0, 0, 0] == width*height:
                    os.remove(path_to_tile)
            if len(os.listdir(path_to_x)) == 0:
                os.rmdir(path_to_x)
#delete_transp_tiles(r'C:\Users\tei\Documents\relief_rus\SRM\test1')
```

Рис. 65. Код функции по удалению прозрачных тайлов



	srtm		srtm
Тип:	Папка с файлами	Тип:	Папка с файлами
Расположение:	C:\Users\tei\Documents\relief_rus\SRM	Расположение:	C:\Users\tei\Documents\relief_rus\SRM
Размер:	2,77 ГБ (2 978 255 798 байт)	Размер:	2,67 ГБ (2 871 281 106 байт)
На диске:	3,10 ГБ (3 337 732 096 байт)	На диске:	2,78 ГБ (2 990 530 560 байт)
Содержит:	Файлов: 143 284; папок: 1 021	Содержит:	Файлов: 58 518; папок: 1 017

Рис. 66. Сравнение папок до и после удаления прозрачных тайлов

Как можно заметить из рисунка выше (рис. 66), вес папки немного сократился (около 100 Мб). Далее предстоял этап сжатия тайлов, поскольку основное преимущество сжатия данных – уменьшение их объема; количество сэкономленного места зависит от метода сжатия и самих данных. Дополнительное преимущество – увеличение производительности, т.к. значительно уменьшается объем передаваемых данных, что позволяет хранить большие, бесшовные наборы растровых данных и быстро доставлять их на клиентский компьютер для отображения.

Как известно, существуют два типа сжатия: без потерь и с потерями. Сжатие без потерь информации означает, что значения пикселей в наборе растровых данных не меняются, тогда как при сжатии с потерями происходит изменение их значений. Степень сжатия зависит от типа пиксельных данных; более однородные изображения имеют более высокую степень сжатия. Данные, которые будут использоваться для анализа, а не только для отображения, следует хранить со сжатием без потерь.

В работе для сжатия сгенерированных .png тайлов была использована программа pngquant-windows (pngquant.org/). Как указано в описании программы, преобразование значительно уменьшает размер файла и сохраняет полную альфа-прозрачность. Это уникальный алгоритм адаптивного сглаживания, который добавляет меньше шума к изображениям и имеет быстрый режим для обработки большого количества изображений. Обращение к этой утилите выполнялось также с помощью Python. После сжатия данным алгоритмом папка с тайлами стала весить больше чем в 5 (!) раз меньше, тем самым удалось уменьшить размер занимаемого дискового пространства на 81 % (рис. 67):

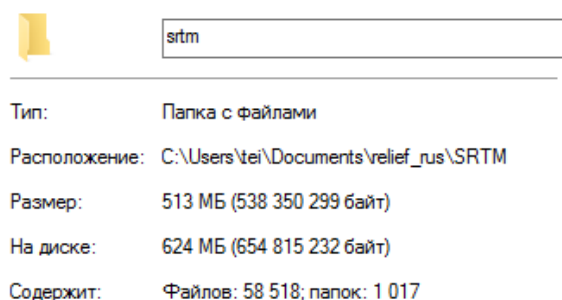


Рис. 67. Папка с тайлами после сжатия утилитой

Кроме этого, после проделанных манипуляций с данными было отмечено увеличение производительности и быстродействия при работе с рельефом как в самом проекте QGIS при составлении карты, так и при выгрузке карты на печать из макета.

Выводы. Создание тайлового набора из исходного тяжелого растрового покрытия позволило решить главные проблемы, связанные с выбором способа хранения и представления растровых данных при составлении аэронавигационных карт. В результате

сжатия полученных тайлов удалось без потери изобразительных свойств исходных растров значительно сократить место на сервере и повысить производительность работы. Поскольку при работе с рельефом отсутствует необходимость анализа, управления наборами растровых данных, то создание тайловой структуры кардинально разрешило ситуацию с долгой выгрузкой карт и невысокой производительностью при работе с ЦМР.

Заключение

В ходе проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ достигнута основная цель диссертации: усовершенствован процесс составления аэронавигационных карт, а именно обеспечен быстрый доступ к растровым данным, содержащим информацию о рельефе, увеличена производительность при составлении карт и выводе их на печать, и, что не менее важно, значительно увеличен объем свободного пространства на сервере за счет создания единого растрового покрытия с тайловой структурой.

Результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

- проведен обзор и анализ предшествующего опыта составления аэронавигационных карт отечественными и международными организациями на основе геоинформационных систем;
- выполнена оценка современного состояния разработок по теме изображения рельефа на картах;
- изучены требования по изображению рельефа на аэронавигационных картах;
- произведен поиск всех доступных источников ЦМР (цифровых моделей рельефа), которые бы удовлетворяли рабочим масштабам картографирования, а также выполнено моделирование новых;
- проделан сравнительный анализ всех ЦМР на основе определения оценки точности по разностям двойных равноточных измерений и визуальная оценка данных, вызванные использованием разнородных источников;
- разработана стилистика для отображения рельефа на аэронавигационных картах;
- составлена единая мультимасштабная растровая основа, содержащая данные о рельефе, выполненная в едином стиле;
- реализована пространственная фильтрация данных в целях устранения шумов и выделения более крупных структур;
- обеспечен быстрый доступ к растровым данным, а также решен вопрос их централизованного хранения.

В дальнейшем планируется разработка приложения, практически полностью автоматизирующее картосоставительский процесс, которое бы потребовало минимум ручного труда и позволило бы издавать все аэронавигационные карты на каждый цикл аэронавигационной информации.

Список использованной литературы:

1. Бахарев Ф.С. Современные структуры баз данных цифровых моделей рельефа//Известия высших учебных заведений, раздел геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. - №5. С. 82 – 85.
2. Берлянт А.М. Картография: учебник. - 3-е издание, дополненное. М.: КДУ, 2011, 464 с.
3. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. Изд. 2, перераб. и доп. М., «Недра», 1977, 367с.
4. Востокова А.В., Кошель С.М., Ушакова Л.А. Оформление карт. Компьютерный дизайн: Учебник / Под ред. А.В. Востоковой. М.: Аспект Пресс, 2002, 288 с.
5. Глобальные цифровые модели рельефа//Геоматика. – 2015. - №3 (28). С. 78 – 82.
6. Дышлюк С.С., Павлов Е.В. К вопросу автоматизированного создания тематических карт//Интерэкспо Гео – Сибирь, том 3. - 2012 г.
7. Заруцкая И.П. Методы составления рельефа на гипсометрических картах. М.: Изд-во геодезической литературы, 1958, 216 с.
8. Кошель С.М. Теоретическое обоснование структуры и функций блока моделирования рельефа в ГИС. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. – М., 2004 г.
9. Лосяков Н.Н., Скворцов П.А., Каменецкий А.В. и др. Топографическое черчение: учебник для вузов. М.: Недра, 1986, 325 с.
10. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник / 2-е изд., испр. – М.: КДУ, 2010. – 424 с.
11. Лутц М. Программирование на Python, 4-е издание. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 992 с.
12. Основы геоинформатики: в 2 кн. Учеб. пособие для студ.вузов / Е.Г.Капралов, А.В.Кошкарёв, В.С.Тикунов и др.; Под ред. В.С.Тикунова.—М.:Издательский центр «Академия», 2004. — 352 с.
13. Руководство по аэронавигационным картам. - Международная организация гражданской авиации, издание третье, 2016. – 404 с.
14. Руководство по картографическим и картоиздательским работам. Часть 2. Составление и подготовка к изданию топографических карт масштабов 1:200000, 1:500000. М., редакционно-издательский отдел, 1987.
15. Салищев А.К. Картоведение: учебник. — 3-е изд. — М.: МГУ, 1990. — 400 с.
16. Самсонов Т.Е. – Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. - 208 с.

17. Самсонов Т.Е. Мультимасштабное картографирование рельефа на основе создания баз геоданных [текст] // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. – М., 2010, 26 с.
18. Сарайский Ю.Н. Геоинформационные основы навигации: Учебное пособие. - СПб: СПбГУГА, 2010, - 245 с.
19. Тикунов В.С. Моделирование в картографии: Учеб. М.: Изд-во МГУ, 1997.
20. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа [текст] // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – 2010, 270 с.
21. Шовенгердт Роберт А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010, 560 с.
22. C. Amante, B.W. Eakins. ETOPO1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. National Geophysical Data Center marine Geology and Geophysics Division, Boulder, Colorado, 2009
23. Cartographic Design Process: Artistic Interpretation With the Geodatabase / An ESRI White Paper, July 2004. — <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/cartographic-design.pdf>
24. Regina O. Obe, Leo S. Hsu. PostGIS in Action. - Manning Publications, 2011. – 492 с.
25. Stefanakis, E. Map Tiles and Cached Map Services//GoGeomatics, Magazine of GoGeomatics Canada. – 2015. - №6.
26. <http://aim.naviar.dk/english/>
27. <https://www.aipchile.gob.cl/aip/vol2/seccion/amdt>
28. <http://ais.ans.cz/?lang=en>
29. <https://ais-en.hungarocontrol.hu/aip/2017-03-30/>
30. <http://www.aisweb.aer.mil.br/?i=cartas>
31. <http://aisview.rlp.cz/?lang=2&map1=25166335&map2=268435456&map3=32&meteo=0&from=20170319202500&to=20170320002500&bott=0&ceil=undefined&zoom=7>
32. <http://www.ais-netherlands.nl/aim/2017-01-19-AIRAC/eAIP>
33. <http://www.armats.com/arm/aviation/products/eAIP/html/index-en-GB.html>
34. <https://aro.lfv.se/Editorial/View/IAIP?folderId=15>
35. <http://www.atalis.aero/presentation.html>
36. https://www.belgocontrol.be/html/belgocontrol_static/eaip/eAIP_Product/index.html
37. https://www.cadac.com/media/3026/doc_br_smartglobe_acs.pdf
38. <http://www.caiga.ru/common/AirClassABV/validaip2/html/rus.htm>
39. <http://www.carmenta.com/en/>
40. <http://www.cgx-group.com/en/index.htm>

41. <http://www.comsoft.aero/products-solutions/aeronautical-information-management/comsoft-solutions-aim>
42. http://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=874&SECTION_ID=26&phrase_id=2973592 – Маслов С.Е., Андрианов В.Ю. ЦАИ – путь к ГИС//ArcReview, №4 (55), 2010
43. http://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1400&SECTION_ID=39 – Для производства карт FAA выбирает PLTS Aeronautical solution//ArcReview, №3 (42), 2007
44. <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/how-raster-data-is-stored-and-managed.htm>
45. <http://eaip.caa.gov.tw/eaip/history/2017-03-28/html/index-en-TW.html>
46. https://en.wikipedia.org/wiki/Tiled_web_map
47. <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/en/Page/1078418725153/?other=1083158950573#ancla7>
48. <http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/aviation/charting>
49. <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/information-management/ais-industry-websites1.pdf> - AIS industry websites, Services/products for AIS
50. https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/aeronav/digital_products/vfr/
51. <http://www.frequentis.com/ru/at/home>
52. <http://www.gebco.net>
53. http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data
54. <http://www.gisa.ru/13555.html>
55. <http://gisinfo.ru/spread/aboutfirm.htm>
56. <http://gisinfo.ru/products/anibase.htm>
57. <http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html> - Дубинин М. Общее описание AsterGDEM, 2012. Материал с Интернет - сообщества Gis-lab
58. <http://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> - Свидзинская Д. Открытая настольная ГИС SAGA – общая характеристика, 2012. Материал с Интернет - сообщества Gis-lab
59. <https://github.com/minorua/TileLayerPlugin>
60. <https://www.idscorporation.com/>
61. <https://www.idscorporation.com/airnavigation/our-solutions-products/aeronautical-information-services-management/products/item/41-ice>
62. <http://www.iflightplanner.com/AviationCharts>
63. http://www.imagico.de/pov/earth_srtm.php - Hormann C. Evaluating void filling data for SRTM DEMs, 2012
64. html/index-en-GB.html
65. <http://kan.kg/ais/eaip/en/index.htm>

66. <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>
67. <http://www.maptiler.org/google-maps-coordinates-tile-bounds-projection/>
68. <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>
69. <http://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-japan-make-aster-earth-data-available-at-no-cost>
70. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>
71. https://onlineexhibitormannual.com/worldatmcongress16/PDF/Brochure_exhiReg2284372_DOC_BR_smartGlobe_Aviation_Solutions.pdf
72. <https://www.pandanavigation.com/browse.php?sec=6&id=2>
73. <http://plugins.qgis.org/plugins>
74. <https://pngquant.org/>
75. <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/data-management/resample.htm>
76. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf>
77. <http://www.reliefshading.com/>
78. <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//0060000000001000000>
79. <https://risk.az/>
80. http://www.saga-gis.org/saga_module_doc/2.1.3/grid_filter.html
81. http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.4/grid_filter_1.html
82. <https://www.sia.aviation-civile.gouv.fr/>
83. http://www.smatrs.rs/AIS/Active/eAIP/06-Jan-2017-NA/2017-01-06/html/index_commands.html
84. <http://www.szrcai.ru/aero/maps?type=company#intermap-vfr>
85. <http://viewfinderpanoramas.org/>
86. <http://viewfinderpanoramas.org/voidfill.html>
87. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Tiles>
88. http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Slippy_map_tilenames
89. http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Zoom_levels
90. http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Bounding_Box
91. http://ww1.jeppesen.com/documents/educational/why-jeppesen-charts/Jeppesen_Charts_FactSheet_GA.pdf
92. <http://ww1.jeppesen.com/aviation/business/additional-info-ifr-paper-services.jsp>